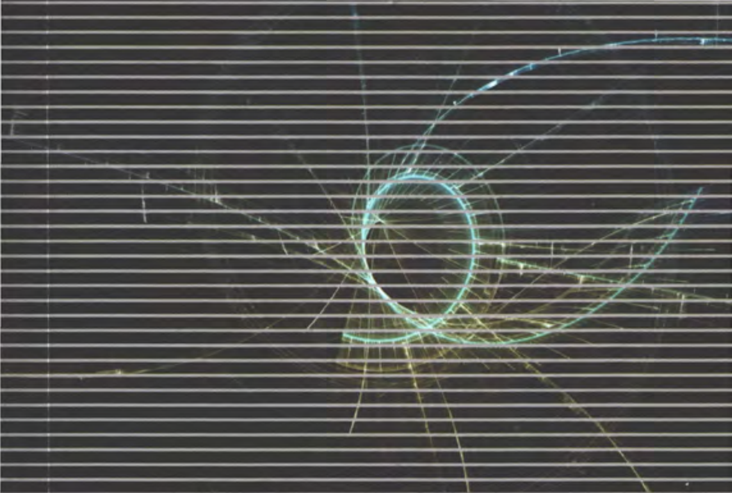


JOHN POLKINGHORNE

KUANTUM

KÜLTÜR KİTAPLIĞI 137

DOST

KÜLTÜR KİTAPLIĞI: 137

D

John Polkinghorne

1968-1979 yılları arasında Cambridge Üniversitesi'nde matematiksel fizik profesörü olarak görev yapmış ve Royal Society'ye seçilmiştir.

Polkinghorne, John
Kuantum
ISBN 978-975-298-506-3 / Türkçesi: Ümit Hüsrev Yolsal
Ocak 2014, Ankara, 148 sayfa
Kültür Kitaplığı: 137; Bilim: 6

KUANTUM

John Polkinghorne

DOST

ISBN 978-975-298-506-3

Kuantum
John Polkinghorne

Birinci baskı, Ocak 2014, Ankara

Türkçesi, Ümit Hüsrev Yolsal

Teknik hazırlık, Mehmet Dirican

Erdal Akalın - Dost Kitabevi
Sertifika No: 12386
Paris Cad. No: 76/7, Kavaklıdere 06680 Ankara
Tel: (0.312) 435 93 70 • Faks: (0.312) 435 79 02
www.dostyayinevi.com • bilgi@dostyayinevi.com

Baskı, Pelin Ofset Ltd. Şti.
Sertifika No: 16157
İvedik Organize Sanayi Bölgesi, Matbaacılar Sitesi
588. Sokak no: 28-30 Yenimahalle / Ankara
Tel: (0.312) 395 25 80-81 • Faks: (0.312) 395 25 84

İÇİNDEKİLER

Paul Adrien Maurice Dirac'ın anısına
1902-1984

Hiç kimsenin kuantum mekaniğini anlamadığını rahatlıkla söyleyebileceğimi düşünüyorum.

Richard Feynman

TEŞEKKÜRLER

Müsveddenin yayıma hazırlanması sırasında sağladıkları yardımdan dolayı Oxford Universtiy Press çalışanlarına ve de özellikle ilk taslağa getirdiği sayısız yorumdan dolayı Shelley Cox'a minnettarım.

John Polkinghorne
Queens' College,
Cambridge

GİRİŞ

1920'lerin ortasında modern kuantum kuramının bulunması, fizik dünyasının doğasını düşünmemizde Isaac Newton'un döneminden sonraki en hacimli revizyonu mümkün kıldı. Açık ve belirli olduğu düşünülen bir süreç alanının, atomaltı köklerindeki davranışının düzensiz ve belirsiz olduğu bulundu. Büyük ölçekli özel ve genel görelilik buluşları, bu devrimci değişimle karşılaştırıldığında, yalnızca klasik temaların ilginç uyarlamaları gibi görünmektedir. Görelilik kuramının önde gelen adı Albert Einstein, modern kuantum kuramını metafizik zevki için çok yavan bulduğundan hayatının sonuna kadar ona karşı acımasız bir muhalefet yürüttü. Kuantum kuramını 20. yüzyılın en sıradışı düşünsel başarılarından biri olarak görmek ve bulunuşunun fiziksel süreç anlayışımızda gerçek bir devrim oluşturduğunu düşünmek abartı değildir.

Bundan dolayıdır ki, kuantum kaynaklı düşüncelerden yararlanma hakkı yalnızca kuramsal fizikçilere ait olmamalıdır. Kuantum kuramının tam anlamıyla ifade edilmesi onun doğal dilinin, yani matematiğin kullanılmasını gerektirse de, birçok temel kavramı, bu dikkat çekici buluşun hikâyesini izlerken biraz zorlanmaya hazırlıklı genel

okuyucu için ulaşılır kılınabilir. Bu küçük kitap, böyle bir okuyucu akılda tutularak yazıldı. Kitabın ana metni, kesinlikle hiçbir matematiksel eşitlik içermemektedir. Kitabın sonundaki kısa ek bölüm, zor kısımların kavranabilmesini olanaklı kılabilecek ek açıklamalar veren birtakım yalın matematiksel içgörüleri özetlemektedir. (Ana metinde bu ekin ilgili bölümlerine yapılan göndermeler koyu şekilde belirtildi.)

Kuantum kuramı, ona kaynaklık eden buluşların gerçekleşmesini izleyen 75 yılı aşkın bir süre boyunca olağanüstü verimli olduğunu ortaya koydu. Günümüzde nükleer maddenin temel bileşenleri olarak önerilen kuarklar ve gluonlar, davranışları kuantumun öncülerinin başlıca ilgi konusu olan atomlardan en az 100 milyon kere küçük kendilikler olmalarına karşın, kuantum kuramı, bunların irdelenişinde güvenle ve başarıyla kullanılmaktadır. Yine de, derin bir paradoks olduğu gibi duruyor. Bu kitabın epigrafı, ikinci nesil büyük kuantum fizikçisi Richard Feynman'ın söylemini karakterize eden aşırı abartılı ifadeyi belirli ölçüde paylaşmaktadır; aritmetik işlemleri nasıl yapacağımızı bilmemize karşın, kuramı olması gerektiği gibi *anlayamayacağımız* bir gerçektir. İleride, önemli yorum sorunlarının çözüme kavuşturulmamış olduğunu göreceğiz. Bu sorunlar, olası çözümler için yalnızca fizik içgörüyü değil, aynı zamanda metafizik kararı da gerekli kılacak.

Gençken, kuantum kuramını ünlü Cambridge ders dizisini verdiği sıra Paul Dirac'ın dizinin dibinde öğrenme ayrıcalığına sahip olmuştum. Dirac'ın derslerinin malzemesi, 20. yüzyılın gerçek klasik bilim yayınlarından biri olan *The Principles of Quantum Mechanics* (*Kuantum Meka-*

niğinin İlkeleri) adlı ufuk açıcı kitabında sunulan incelemeyle çok uyumluydu. Dirac'ı ilham kaynağı ve bir tür bilim azizi haline getiren şey, kişisel olarak tanıdığım en büyük kuramsal fizikçi olmasının yanı sıra ruhunun saflığı ve alçakgönüllü tavrıydı (derslerinde kuantumun temelleri için sağladığı büyük katkılardan hiçbir şekilde söz açmadı). Bütün alçakgönüllülüğümle bu kitabı onun anısına adıyorum.

I. Bölüm

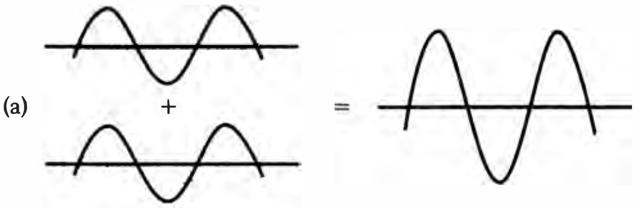
KLASİK ÇATLAKLAR

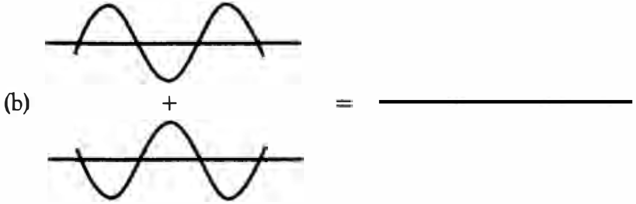
Modern fizik biliminin ilk gelişimi, doruk noktasına 1687 yılında Isaac Newton'un *Principia* adlı yapıtının yayınlanmasıyla birlikte ulaştı. Bunun ardından, mekaniğe, parçacıkların devinimlerini açık ve belirlenimci bir biçimde betimleyebilen olgun bir bilim olarak yerleşiklik kazandırıldı. 18. yüzyıl sonu itibariyle bu yeni bilim eksiksizmiş gibi görünmeye başladı. Öyle ki, Newton'un en büyük izleyicisi Pierre Simon Laplace, sınırsız bir hesaplama gücüyle donatılan ve bütün parçacıklarının zamanın bir anındaki düzenlerinin eksiksiz bilgisinin verildiği bir varlığın, bütün evrenin geleceğini kestirmek ve aynı kesinlikle geçmişe ilişkin geriye dönük bir kestirimde bulunmak için Newton'un eşitliklerini kullanabileceğini savunan ünlü iddiasını öne sürebildi. Mekaniğe ilişkin bu etkileyici sav, aslında, mekaniğe düzülen övgülere daima kuşkuyla yaklaşılmasına neden oldu. Birinci olarak, insanlar kendilerini otomatik bir saat düzeneği gibi deneyimlemezler. İkinci olarak, Newton'un kesin gibi empoze edilen başa-

rıları, o sırada bilinen fiziksel dünyanın bütün boyutlarını kapsamamaktaydı. Newton'un bireşiminin kendi içinde yeterli olduğuna duyulan inancı tehdit eden, çözüme ulaştırılmamış sorunlar vardı. Sözgelimi, Sir Isaac'in bulmuş olduğu evrensel kütle çekimi terskare kanununun gerçek doğası ve kökeni, çözümlenmesi gereken bir sorundu. Bu, Newton'un kendisinin de bir varsayım tasarlamaya eğildiği bir konuydu. Ayrıca, ışığın doğası da çözümlenmeyi bekleyen bir sorundu. Newton bu konuda kendisine belirli bir spekülatif rahatlık tanımıştı. *Opticks* (Optik) adlı yapıtında, bir ışık ışınının ufacık parçacıkların akışından oluştuğu görüşüne meyletti. Bu tür bir parçacık kuramı, Newton'un fiziksel dünyayı atomcu terimlerle açıklama eğilimiyle uyumluydu.

Işığın doğası

Işığın doğasını anlamada gerçekten ilerleme kaydedildiği 19. yüzyıla kadar fark edilemedi. Yüzyılın başlarında, 1801 yılında, Thomas Young, ışığın dalga hareketi karakterine sahip olduğuna ilişkin ikna edici kanıtlar sundu. Bu sav, aslında Newton'un Hollandalı çağdaşı Christiaan Huygens'in bir yüzyıl kadar önce ortaya attığı bir spekülasyondu. Young'ın temel gözlemleri günümüzde girişim fenomenleri dediğimiz etkiler üzerinde yoğunlaştı. Girişim fenomenlerinin bildik bir örneği, değişen aydınlık ve karanlık bantlarının varlığıdır. Sir Isaac, bu bantları Newton halkaları diye adlandırılan bir olguda yeterince ironik biçimde göstermişti. Bu türden etkiler, dalgaların ayırt





1. Üst üste binen dalgalar: (a) uyumlu; (b) uyumsuz.

edici özellikleridir ve şu biçimde oluşurlar: İki dalga dizisinin birleşme biçimi, salınımları arasındaki ilişkinin nasıl olduğuna bağlıdır. Eğer salınımları uyumlu (fizikçilerin söyledikleri gibi aynı evreli) ise, dalga tepesi yapısal olarak en yüksek mukabil gücü vererek diğer dalga tepesiyle çakışacaktır. Tepelerin çakışması ışık örneğinde gerçekleşirse parlama bantları görürüz. Buna karşılık, iki dalga dizisi kesinlikle uyumsuz (zıt evreli) iseler, dalga tepeleri karşılıklı olarak birbirlerini söndüren bir biçimde çakışırlar ve bir karanlık bandı görülür. Nitekim, değişen aydınlık ve karanlık girişim örüntülerinin ortaya çıkması dalgaların mevcudiyetinin açık bir imzasıdır. Young'ın gözlemleri sorunu çözmüş gibi görünmekteydi. Işık dalga niteliklidir.

19. yüzyıl boyunca, ışıkla birleştirilen dalga hareketinin doğası açıklığa kavuşuyor gibiydi. Hans Christian Oersted ve Michael Faraday'ın önemli buluşları, ilk bakışta karakterleri farklı gibi görünen elektrik ile manyetizma olgularının aslında birbirleriyle yakından bağlantılı olduklarını gösterdi. Bunların tutarlı bir elektromanyetizma kuramı oluşturmak için birleştirilebilecekleri yordam, daha sonra James Clerk Maxwell tarafından belirlendi. Maxwell, adı rahatlıkla Isaac Newton'la birlikte anılabilecek bir dâhiydi. Maxwell hâlâ elektromanyatizma kuramının temel ilkelerini oluşturan ünlü eşitliklerini, 1873 yılında, tüm zamanların bilim klasiklerinden biri olan *Treatise on Electricity and Magnetism* (*Elektrik ve Manyetizma Üzerine İncelemeler*) adlı yapıtında ortaya koydu. Maxwell, bu eşitliklerin dalgaya ilişkin çözümler sağladığını ve bu dalgaların hızlarının bilinen fizik sabitleri aracılığıyla belirlenebileceğini fark etti. Bunun bildik ışık hızı olduğu ortaya çıktı!

Maxwell'in buluşu, 19. yüzyıl fizikçilerinin en büyük zaferi olarak kabul edildi. Işığın elektromanyetik dalgalar olduğu gerçeği, olabildiğince kesin bir biçimde saptanmış gibi görünüyordu. Maxwell ve çağdaşları, dalgaların ether diye adlandırılan, her tarafa yayılan esnek bir ortamdaki salınımlar olduğunu düşündüler. Maxwell, bir ansiklopedi maddesinde, etherin bütün fizik kuramındaki en iyi doğrulanmış kendilik olduğunu söyledi.

Newton'un ve Maxwell'in fiziklerine klasik fizik diyoruz. Klasik fizik, 19. yüzyıl itibariyle etkileyici bir mabet haline gelmişti. Lord Kelvin gibi asil ihtiyarların fiziğin bütün büyük düşüncelerinin artık bilindiğini ve yapılması gerekenin ayrıntıları giderek artan bir doğrulukla düzelt-

mek olduğunu düşünmeleri sıradan bir durumdu. Yüzyılın son çeyreğinde, Almanya'da akademik bir kariyer yapmayı tasarlayan genç bir fizikçi, fiziğin geleceği konusunda ikaz edildi. Fizik yolun sonuna geldiği ve yapılmaya değer çok az şey kaldığı için başka bir alanla ilgilenmek daha iyi olacaktı. Bu genç adamın adı Max Planck'tı ve bereket versin ki ona verilen öğüdü dinlemedi.

Aslında, klasik fiziğin mükemmel görünüşünün arkasındaki çatlaklar belirginleşmeye başlamıştı. Amerikalı Michelson ve Morley 1880'lerde Yer'in etherdeki hareketini ispatlamaya yönelik birtakım akıllıca deneyler yaptı. Bu deneylerin temel düşüncesi, ışık bu ortamda dalga ise, onun ölçülen hızının gözlemcinin ethere göre nasıl hareket ettiğine bağlı olması gerektiği yönündeydi. Denizdeki dalgaları düşünün. Bu dalgaların bir gemiden gözlemlendiğinde fark edilen hızları, teknenin dalgalarla birlikte mi yoksa dalgalara karşı mı ilerlediğine bağlıdır. Hız, birinci durumda ikinci durumdakinden daha az gözükür. Bu deney, karşılıklı olarak dikey doğrultuda iki ışığın hızını karşılaştırmak için tasarlandı. İki hızın aynı olması ancak ölçümlerin yapıldığı sırada Yeryüzü rastlantısal biçimde ethere göre hareketsiz ise beklenebilir. Bu olasılık, deney Yeryüzünün yörüngesinden farklı bir doğrultuda hareket edebileceği birkaç ay sonra tekrarlanarak dışlanabilirdi. Aslında, Michelson ve Morley hızda bir farklılık bulamadılar. Bu problemin çözümü, etheri bütünüyle gereksiz kılan Einstein'ın özel görelilik kuramıyla mümkün olabilecekti. Bu büyük buluşun, mevcut hikâyemizle ilişkili olmasa da, eskisi kadar önemli ve şaşırtıcı olan göreliliğin, klasik fiziğin açıklık ve belirlenimcilik niteliklerini ortadan

kaldırmadığına dikkat edilmelidir. Bunun içindir ki, giriş bölümünde, özel göreliliğin, kuantum kuramının talep ettiği denli köktenci bir yeniden düşünmeye gerek duymadığını iddia ettim.

Işık izgesi

Kuantum kuramının yolda olduğunun ilk işareti, ne anlama geldiğinin farkına varılmadığı bir zamanda, 1885 yılında belirdi. Balmer adlı İsviçreli bir öğretmenin matematiksel karalamalarından doğdu. Balmer, hidrojenin izgesi, yani akkor gaz ışığının prizmadan geçirilerek ayrıştırılması sonucunda bulunan ayrı renk çizgileri dizisi üzerinde çalışıyordu. Farklı renkler, ışık dalgalarının içerdiği farklı sıklıklara (salınım oranlarına) karşılık gelir. Balmer sayılarla uğraşırken bu sıklıkların daha yalın matematik formülleriyle [bkz. Matematik eki, 1] tanımlanabileceğini buldu. O dönemde bu yalnızca bir merak olarak görülecekti.

Daha sonra, insanlar, Balmer'in sonuçlarını kendi çağdaş atom görüşlerinden hareket ederek anlamaya çalıştılar. 1897 yılında, J. J. Thomson, bir atomdaki eksi yükün daha sonra "elektronlar" adı verilen küçük parçacıklar tarafından taşındığını buldu. Dengeli eksi yüklerin atom aracılığıyla yayıldığı varsayıldı. Bu düşünce, elektronların üzüm, artı yükün ise puding rolünü oynadığı "plum pudding modeli" (üzümlü puding modeli) olarak adlandırıldı. Ayrıca, ışık izgesi sıklıklarının, elektronların artı yüklü "puding"de salınımda bulanacakları çeşitli biçimlere karşılık gelmeleri gerekmekteydi. Ne var ki, bu düşüncenin görgül bakım-

dan tatminkâr bir biçimde çalışmasını olanaklı kılmanın aşırı zor olduğu ortaya çıktı. Balmer'in sıradışı buluşunun doğru açıklamasının çok farklı bir dizi düşünce yoluyla bulunduğunu göreceğiz. O dönemde bu sorunlar yaygın bir kaygıya yol açtığından, atomların doğası büyük olasılıkla anlaşılması çok zor bir konu olarak görülmekteydi.

Morötesi yıkım

Çok daha açık bir biçimde meydan okuyan ve kafa karıştıran bir başka sorun, 1900 yılında Lord Rayleigh tarafından gün ışığına çıkarıldı. "Morötesi yıkım" diye adlandırılan bu sorun, 19. yüzyılın bir başka büyük buluşu olan istatiksel fiziğin düşüncelerinin uygulanmasından doğdu. Bu alanda, bilim insanları, ayrıntılı devinimleri çok farklı biçimler alabilen çok karmaşık sistemlerin davranışlarını anlamak için uğraşıyorlardı. Böyle karmaşık bir sistem örneği, her birinin kendine ait bir devinim durumu olan birçok farklı molekülden oluşmuş bir gaz olabilir. Bir başka örnek, birçok farklı frekans arasında dağılan katkılardan oluşan ışınımsal enerji olabilir. Bu karmaşık sistemlerde ne olduğunu bütün ayrıntılarıyla izlemek olanaksızdır; ama genel davranışlarının bazı önemli boyutları anlaşılabilir. Bu doğruydu, çünkü ortak davranış, devinim durumlarının çok sayıdaki bileşenlerinin katkılarından alınmış büyük ortalamadan doğar. Bu olasılıklar arasında en olanaklı dizi, en olası görünen o olduğu belirgin bir biçimde ortaya çıktığı için baskın çıkar. Clerk Maxwell ve Ludwig Bolzmann, verili bir hacim ve ısıdaki bir gazda bulunan basınç

gibi karmaşık bir sistemin bütüncül kesin özelliklerinin olasılığın azamileştirilmesi temelinde güvenilir bir biçimde hesaplanabileceğini göstermeyi başarabildiler.

Rayleigh, istatiksel fiziğin bu tekniklerini siyah cisim ışımasında enerjinin farklı frekanslar arasında nasıl dağıldığı problemine uyguladı. Siyah bir cisim, üzerine düşen bütün ışımayı mükemmel bir biçimde soğuran ve ardından bu ışımayı bütünüyle tekrar dışarıya salan bir cisimdir. Siyah bir cisimde eşit ışınım izgesi sorunu egzotik bir soru gibi görünebilir. Ama siyah cisimler için kullanışlı mükemmel yaklaşımlar bulunduğundan, bu sorun, örneğin özel olarak hazırlanmış bir ocağın içerisindeki ışınım araştırılarak, kuramsal olduğu kadar deneysel olarak da incelenebilecek bir durumdur. Sorun, yanıtın, cismin yapısının bir başka ayrıntısına değil, yalnızca ısısına dayanması gerektiğinin bilinmesi sayesinde yalınlaştırıldı. Rayleigh, istatiksel fiziğin iyice sınanmış düşüncelerinin doğrudan uygulanmasının felaketle sonuçlandığına işaret etti. Hesaplama, ölçülen izgeyle uyuşmadığı gibi, hiçbir şey ifade etmemekteydi. Sonsuz miktarda enerjinin, çok yüksek frekanslarda yoğunlaşmış olarak bulanacağı kestiriminde bulunuldu. Bu can sıkıcı sonuç, “morötesi yıkım” diye adlandırıldı. Bu sonucun bir yıkım niteliğinde olduğu yeterince açıktır: “Morötesi”, “yüksek frekanslar” demenin bir başka yoludur. Yıkımın nedeni, klasik istatistiksel fiziğin, sistemin her bir serbestlik derecesinin (bu durumda, ışınımın dalgalanabildiği her bir farklı biçimin) aynı miktarda sabit enerjiyi, yalnızca sıcaklığa dayanan bir niceliği taşıyacağı kestiriminde bulunmasıydı. Yüksek frekansta daha çok sayıda uyumlu salınım biçiminin bulunması nedeniyle,

yüksek frekanslar, sınırsız enerji niceliklerini biriktirerek her şeyi beraberlerinde sürükler. Bu sorun, klasik fiziğin mükemmel dış görüntüsünde nahoş bir çatlak olduğunun ötesinde bir anlama gelmekteydi. Daha doğrusu, yapısal bir gediğin söz konusu olduğunu ifade ediyordu.

Artık Berlin'de bir fizik profesörü olan Max Planck, bir yıl içinde, bu çıkmazı çözmenin dikkat çekici bir yolunu buldu. Oğluna Newton'unkiler kadar önemli bir buluş gerçekleştirdiğine inandığını söyledi. Bu abartılı bir iddia gibi görülebilirse de, Planck yalnızca yalın bir gerçeği dile getiriyordu.

Klasik fizik, siyah cismin içine ve ondan dışarıya sürekli biçimde sızan ışınımın daha çok bir süngerden sızan suya benzediğini düşünmekteydi. Klasik fiziğin sakin bir biçimde değişen dünyasında başka bir varsayım kesinlikle olanaklı görünmüyordu. Yine de, Planck, ışınımın zaman zaman belirli büyüklükteki enerji paketleri tarafından yayıldığını ve soğurulduğunu iddia ederek bir karşı önermede bulundu. Planck, (paketler olarak adlandırılan) bu *kuanta*nın enerji içeriğinin ışınım frekansıyla orantılı olacağını belirtti. Günümüzde Planck sabiti olarak bilinen orantılılık sabiti, evrensel bir doğa sabiti olarak kabul edildi. Planck sabiti *h* simgesiyle gösterilir. *h*'nin büyüklüğü gündelik deneyimde karşılaşılan büyüklüklere göre çok küçüktür. Bu nedenle, ışınımın kesintili davranışı daha önce fark edilmemiştir; birbirine çok yakın bir sıra küçük nokta kesintisiz bir çizgi gibi gözükür.

Bu cesur varsayımın doğrudan sonucu, yüksek frekanslı ışınımın yalnızca önemli ölçüde yüksek enerji kuantumu içeren olaylarda yansıtılabileceği ya da soğurulabileceğiy-

di. Bu büyük enerji kotası, bu yüksek frekanslı olayların klasik fiziğin beklentilerine kıyasla sert bir biçimde bastırılacağı anlamına geldi. Yüksek frekansların bu yolla yararlı ve güvenli kılınması, morötesi yıkıma son vermekle kalmadı, ayrıca görgül sonuçlarla tam anlamıyla uyuşan bir formül ortaya koydu.

Planck, açıkça büyük önem taşıyan bir şey üzerinde çalışmaktaydı. Ama başlangıçta ne o ne de başkaları bundan kesin biçimde emindi. Kuanta ne kadar ciddiye alınmalıydı? Kuanta bir ışınımın daimi özelliği miydi yoksa yalnızca ışınımın siyah cisimle etkileşime girme biçiminin bir boyutu muydu? Her şeye karşın, bir çeşmeden damlayan damlaların biçimlendirdiği bir dizi su kuantası, lavaboya düşer düşmez oradaki suyla karışır ve kendi bireysel benzeşliğini yitirir.

Fotoelektrik etkisi

Bir sonraki ilerleme, Bern Patent Bürosu'nda üçüncü sınıf bir teknik uzman olarak çalışırken zamanı ellerinin arasında tutan genç bir adam tarafından gerçekleştirildi. Bu genç adamın adı Albert Einstein'dı. Einstein, *annus mirabilis* (mucize yıl) 1905'te üç temel buluş gerçekleştirdi. Bu buluşlardan birinin, kuantum kuramının ilerleyen öyküsündeki bir sonraki adımı oluşturduğu ortaya çıktı. Einstein, fotoelektrik araştırmalarının ortaya çıkardığı kafa karıştırıcı özellikler üzerinde yoğunlaştı [2]. Fotoelektrik, bir ışık demetinin bir metalden elektronlar yayması olayıdır. Metaller, kendi içlerinde hareket edebilen elektronlar içerseler de (onların akışı elektrik akımını

oluşturur), bu elektronların metalden bütünüyle kurtulmak için yeterli enerjileri yoktur. Gerçekleşen fotoelektrik etki kesinlikle şaşırtıcı değildi. Işınım metalin içine hapsolmuş elektronlara enerji aktarır ve, eğer kazanım yeterli olursa, elektron onu alıkoyan güçlerden kurtulabilir. Klasik düşünme biçimine göre, elektronlar ışık dalgalarının "eşiği" tarafından harekete geçirilir ve bazıları metalden kurtulmak için yeterince bozunabilir. Bu tanıma göre, kurtulmanın derecesi, demetin enerji içeriğini yoğunluk belirlediğinden, demetin yoğunluğuna bağlıdır; ama gelen ışığın frekansına bağlı olduğu hiçbir biçimde öngörülmez. Deneyler, fiili gerçekte tam tersi bir davranışın söz konusu olduğunu gösterdi. Demetin frekansı belirli bir kritik sıklığın altındaysa, yoğunluğu ne olursa olsun elektronlar salınmazken, bu sıklığın üzerine çıkan zayıf bir demet bile elektron yayabilir.

Einstein, ışık demeti kesintisiz bir kuanta akışı olarak düşünülürse, bu kafa karıştırıcı davranışın anında anlaşılabilir hale geleceğini düşündü. Bir elektron, ona bu kuantadan biri çarpıp bütün enerjisini ona bıraktığı için yayılır. Bu kuantumdaki enerji, Planck'a göre, doğrudan frekansla orantılıydı. Eğer frekans çok düşükse, çarpışmada elektronun yayılmasını mümkün kılacak yeterli enerji aktarılamaz. Öte yandan, frekans bir kritik değeri aşıyorsa, elektronun kurtulmasını sağlayacak yeterli enerji söz konusu olur. Demetin yoğunluğu açıkça onun kaç tane kuanta içerdiğini belirlediğinden, çarpışmalara kaç tane elektronun dâhil olduğunu ve kaç tanesinin yayıldığını da belirler. Yoğunluğun artırılması bir tek çarpışmadaki aktarılan enerjiyi değiştirmez. "Fotonlar" diye adlandırılan ışın

kuantasının varlığının ciddiyetle ele alınması, fotoelektrik etkisinin gizemini açıkladı. Genç Einstein büyük bir buluş gerçekleştirmişti. Nihayet, Einstein sonunda bu buluşundan dolayı Nobel Ödülü aldı. İsveç Akademisi ödülü verirken, muhtemelen, Einstein'ın 1905 yılındaki diğer iki büyük buluşunu –özel görelilik ve moleküllerin gerçekliğinin ikna edici ispatı– göz önünde tuttuysa da, onun bu biçimde ödüllendirmesi hâlâ tartışılmaktadır!

Fotoelektrik etkisinin kuantum analizi büyük bir fizik zaferiydi; ama, yine de, büyük kayıplar karşılığında kazanılan bir zafer gibi görünmekteydi. Konu şimdi ciddi bir bunalımla karşı karşıyaydı. 19. yüzyılın ışığın dalga yapısına ilişkin büyük görüleri, bu yeni düşüncelerle nasıl bağdaştırılacaktı? Sonuç olarak, bir kuantum bir parçacık, bir tür küçük çekirdekken, bir dalga yayılan, esnek bir şeydir. Her ikisi birden nasıl doğru olabilirdi? Fizikçiler uzun bir süre ışığın dalgalı/parçacıklı yapısından doğan bu rahatsız edici paradoksla yaşamak zorunda kaldılar. Young'ın ve Maxwell'in ya da Planck'ın ve Einstein'ın içgörüleri reddedilmeye çalışılarak gelişme kaydedilemezdi. Fizikçiler durumu anlamlandıramasalar da, bu deneyime düşünsel bir dirençle dayanmak zorundaydılar. Birçoğu bu durum karşısında korkakça bakışlarını başka yöne çevirdi. Buna rağmen, hikâyenin mutlu bir sonla biteceğini göreceğiz.

Nükleer atom

Bu sırada, dikkatler, ışıktan atomlara yöneldi. 1911 yılında, Manchester'da, Ernest Rutherford ve birkaç genç

meslektaşı, α-parçacıkları diye adlandırılan, ufak, artı yüklü mermilerin ince altın fotoğraf levhasına çarptıklarında nasıl davrandıklarını araştırmaya başladılar. Birçok α-parçacığı araştırmacıları şaşırtacak biçimde az etkilenerek levhadan geçerken, bazıları yollarından adamakıllı saptılar. Rutherford, daha sonra, bunun 15'lik bir top mermisinin ince bir kağıt tabakasına çarparak geri dönmesi kadar şaşırtıcı olduğunu söyledi. Plum pudding atom modeli bu sonucu açıklayamıyordu. α-parçacıkları kekin içinden geçen bir kurşun gibi yol almalıydılar. Rutherford bu ikilemden kurtulmanın bir tek yolu olduğunu çok çabuk gördü. Artı α-parçacıklarını iten artı yüklü altın atomları, "puding" modelinde olduğu gibi saçılamazlar; hepsi atomun merkezinde yoğunlaşmış olmalıdır. Böyle yoğun bir yükle yakından temas etmek bir α-parçacığını büyük oranda yolundan saptıracaktır. Yeni Zelanda'da üniversite öğrencisiyken eski bir mekanik ders kitabı yayınlayan –mükemmel bir deneysel fizikçi olmasına karşın, bir matematikçi olarak bu denli yetkin değildi– Rutherford, eksi elektronların atomun merkezindeki artı yükün çevresinde dairesel yörüngelerle döndükleri düşüncesinin gözlenen davranışa mükemmel uyduğunu göstermeyi başarabildi. "Plum pudding" modeli, yerini bir anda "güneş sistemi" atom modeline bıraktı. Rutherford ve meslektaşları atom çekirdeğini keşfetmişlerdi.

Bu büyük bir başarıydı; ama, yine de, ilk bakışta büyük kayıplar karşılığında kazanılan bir zafer gibi görünmekteydi. Aslında, çekirdeğin bulunması klasik fiziği derin bir bunalıma sürükledi. Eğer bir atomdaki elektronlar çekirdeğin çevresinde dönüyorlarsa, devinim yönlerini sürekli olarak

değiştiriyorlardır. Klasik elektromanyetik kuramına göre, bu süreçte elektronların enerjilerinin bir kısmını saçılıma uğratmaları gerekmektedir. Sonuç olarak, elektronlar çekirdeğin etrafında düzenli bir biçimde devinmelidirler. Bu gerçekten yıkıcı bir sonuçtu, çünkü bileşen elektronlar merkeze doğru hareket ettiğinde atomların istikrarsızlaştığı düşüncesini içerimlemektedir. Dahası, bu bozunum sırasında Balmer formülünün keskin ışınım izgesine benzemeyen sürekli bir ışınımın örüntüsü yansıyacaktır. 1911 yılından itibaren büyük klasik fizik mabedi çatırdamaya başladı. Bir deprem yaşamıştı.

Bohr atomu

Buna karşın, kuramsal fizik Planck ve morötesi yıkım durumlarında olduğu gibi, cesur ve köktenci bir yeni varsayım öne sürerek başarısızlıktan başarı çıkarmak için hazırda bekliyordu. Dönem, Rutherford'un Manchester'ında çalışan genç Danimarkalı Niels Bohr adlı gencin dönemiydi. 1913 yılında, Bohr, devrim niteliğinde bir önermede bulundu [3]. Planck, enerjinin siyah bir cismin içine ve ondan dışarıya kesintisiz bir süreçle sızdığını savunan klasik düşüncenin yerine enerjinin kesintili bir süreçle kuanta olarak salındığını ya da soğurulduğunu öne süren bir anlayışı ortaya koydu. Matematiksel terimlerle, bu, daha önce herhangi bir olası değeri alabileceği düşünülen değiş tokuş edilmiş enerji gibi bir niceliğin artık yalnızca (1, 2, 3,... paketlerinin içerdiği) bir dizi kesin değer alabileceğinin kabul edilmesi anlamına gelmekteydi. Matematikçiler

kesintisizin yerini kesintilinin almış oluğunu söyleyecek-lerdir. Bohr, bunun yavaş yavaş doğmakta olan yeni bir tür fizikteki çok genel bir eğilim olabileceğini düşündü. Bohr, Planck'ın ışınıma uygulamış olduğu ilkelerin benzerlerini atomlara uyguladı. Klasik bir fizikçi, elektronların bir çekirdek çevresinde, yarıçapları herhangi bir değer alabilecek yörüngelerde döneceklerini varsayacaktır. Bohr, bu kesintisiz olasılığın yerine, yarıçaplar (birinci, ikinci, üçüncü,... diye numaralandırılabilecek) bir dizi farklı değer alabilirler yollu farklı bir koşul öne sürdü. Ayrıca, Planck sabiti *h*'yi içeren bir yöntem kullanarak bu olası yarıçapların nasıl hesaplanacağına ilişkin kesin bir iddiada bulundu. (Önerme, elektronun aynı fiziksel birimlerde *h* olarak ölçülen dönme hareketinin bir ölçümü olan açısal devingenlikle ilişkiliydi.)

Bu önermelerden iki sonuç doğdu. Biri, oldukça arzu edilir olan, atomların kararlılığının yeniden teşkil edilmesiydi. İzin verilen en küçük yarıçapa (aynı zamanda en düşük enerji durumuna) karşılık gelen bir durumdaki elektron hiçbir yere gidemeyeceğinden daha fazla enerji kaybedilemez. Elektron, büyük yarıçaptan uzaklaştıkça, enerji kaybederek bu en düşük duruma varmış olabilirdi. Bohr, bu olduğunda, fazla enerjinin bir tek foton olarak ışınım saçacağını varsaydı. Bu düşünceyi kanıtlayan hesapların yapılması, doğrudan, Bohr'un cesur varsayımının ikinci sonucuna, Balmer formülünün izgesel çizgilere ilişkin kestirimine götürdü. Bu gizemli sayısal formül, yaklaşık 30 yıl sonra, açıklanamaz bir gariplikten yeni atom kuramının anlaşılabilir bir özelliğine dönüştü. İzgesel çizgilerin keskinliğinin, kuantum düşüncesinin karakteristik

bir özelliği olarak kabul edilmeye başlayan kesintililiğin bir yansıması olduğu düşünüldü. Klasik fizik temelinde beklenilen sürekli helezonik hareketin yerine, bir yörünge yarıçapından daha küçük bir yörünge yarıçapına zıplayan süreksiz kuantum konuldu.

Bohr atomu büyük bir zaferdi. Ama birçok yönden klasik fizik esinli bir onarma eyleminden doğmuştu. Bohr'un öncü çalışması, gerçekte, önemli bir onarma, yıkıntı haline gelmiş fizik mabedinin yamanmasıydı. Bu kavramları daha da genişletme girişimleri sorunlarla ve tutarsızlıklarla karşılaştı. "Eski kuantum kuramı" diye adlandırılan bu çabalar, Newton'un ve Maxwell'in klasik düşünceleriyle Planck'ın ve Einstein'ın kuantum yönergelerinin tedirgin edici ve uzlaşmaz bir birleşimiydi. Bohr'un çalışması kuantum fiziği tarihinde çok önemli bir adımdı; ama yalnızca garip düşüncelerin bütünlüklü ve tutarlı bir açıklaması olan "yeni kuantum kuramı"na giden yol üzerindeki geçici bir konaklama noktasıydı. Yeni kurama ulaşılmadan önce, kuantum düşüncesiyle başa çıkmanın bir yolunun bulunmasını zorunlu kılan bir başka önemli olgu ortaya çıktı.

Compton saçılımı

Amerikalı fizikçi Arthur Compton, 1923 yılında, X ışınlarının (yüksek frekanslı elektromanyetik ışınım) madde olarak saçılımını araştırdı. Saçılan ışınımın frekansının değiştiğini buldu. Dalga düşüncesine göre, bu anlaşılabilir bir şey değildi. Dalga düşüncesi, saçılma sürecinin, atomlardaki elektronların gelen dalga enerjisini massetmesi ve

onları tekrar salması sonucunda oluştuğunu ve bunun bir frekans değişikliği olmaksızın gerçekleştiğini koyutlar. Foton tanımına göre, bu sonuç kolaylıkla anlaşılmaktaydı. Fotonun enerjisinin bir kısmının elektrona geçtiği süreç, bir elektron ile bir foton arasındaki "bilardo topu" çarpışmasından ibaretti. Planck formülüne göre, enerji değişimi frekans değişimiyle aynı şeydir. Nitekim, Compton, Planck'ın gözlemlerinin niceliksel bir açıklamasını sağlayarak elektromanyetik ışınımın parçacık karakterinde olduğunun o zamana kadarki en ikna edici kanıtını sundu.

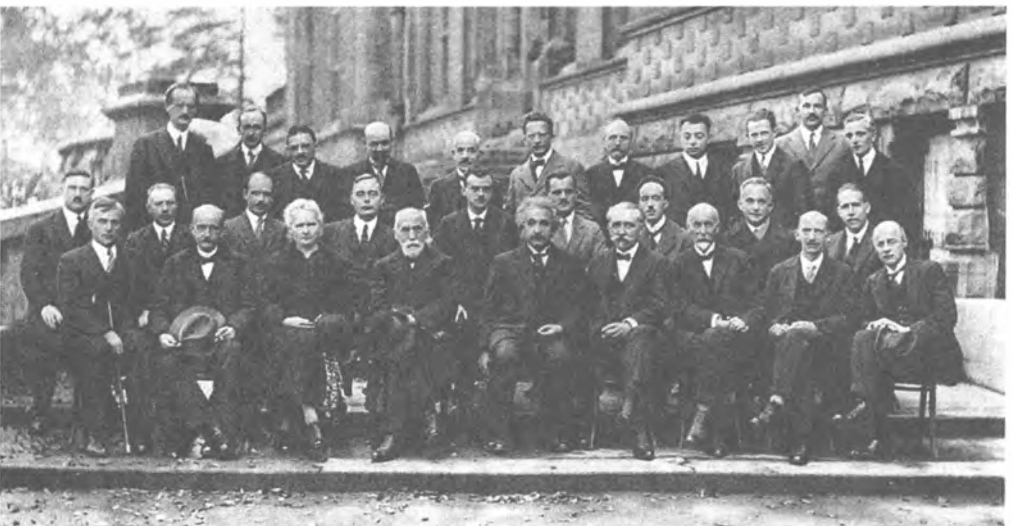
Bu bölümde ele alınan buluşlar dizisinin neden olduğu kafa karışıklığı kısa sürede giderildi. Compton'un çalışmasını izleyen iki yıl içinde önemli ve kalıcı bir kuramsal ilerleme kaydedildi. Yeni kuantum kuramı ufukta belirmeye başlamıştı.

II. Bölüm

ŞAFAK SÖKÜMÜ

Max Planck'ın öncü önermesini izleyen yıllar, fizik topluluğu için bir kafa karışıklığı ve belirsizlik dönemi oldu. Işık, dalgalardı; ışık, parçacıklardı. Bohr atomu gibi umut veren başarılı modeller yeni bir fizik kuramının ortaya çıkmasının yakın olduğu vaadinde bulunmasına rağmen, kuantum parçalarının klasik fiziğin metruk yıkıntılarına hatalı bir biçimde dayatılması, tutarlı bir resmin ortaya çıkabilmesi için daha fazla içgörüye ihtiyaç olduğunu gösterdi. Nihayet şafak doğduğunda, bu, tıpkı tropik bir gündoğumu gibi aniden oldu.

Modern kuantum kuramı 1925 ve 1926 yıllarında tam anlamıyla olgunluğa erişti. Kuramsal fizikçiler topluluğunun belleğinde önemli bir anı olarak kalan *anni mirabiles*, yaşayan bir belleğin artık bu destansı yılları kolay kolay yeniden tecrübe edemeyeceği gerçeğine rağmen, korkuyla karışık bir saygıyla anımsandı. Fizik kuramının temel boyutlarında yeni sıkıntılar ortaya çıktığında, insanlar, "1925 yılı tekerrür ediyormuş gibi hissediyorum" dendiğini du-



2. Kuantum kuramının muhteşemliği ve iyiliği: Solvay Konferansı, 1927.

yabilirler. Bu uyarının özlem belirten bir yönü de vardır. Wordsworth'ün Fransız Devrimi için söylediği gibi: "En büyük mutluluk, gün ağarırken canlı olmaktı; ama genç olmak hakiki saadetti!" Aslında, fizik alanında son 75 yıl içinde birçok önemli gelişme kaydedildi; ama fizik ilkelerinin kuantum kuramının beklenen doğuşunun gerektirdiği denli köktenci biçimde gözden geçirilmesi bir daha söz konusu olmadı.

Özellikle iki insan, neredeyse eşzamanlı bir biçimde şaşırtıcı düşünceler ortaya koyarak kuantum devriminin sürmesini sağladı.

Matris mekaniği

Bunlardan biri genç Alman kuramcı Werner Heisenberg'di. Heisenberg atom izgesinin ayrıntılarını anlamaya çalıştı. İzge bilgisi, modern fiziğin gelişiminde önemli bir rol oynadı. Bunun bir nedeni, izge çizgilerinin frekanslarının ölçümünde kullanılan deneysel tekniklerin çok hassas olabilmelerinden ötürü, kuramcıların çözmeleri için çok kesin problemler ortaya koyan oldukça doğru sonuçlar sağlamış olmalarıdır. Bunun basit bir örneğini, Balmer'in hidrojen izgesi formülünde ve Bohr'un atom modeliyle açıklamaya çalıştığı hidrojen izgesi örneğinde görmüştük. Bu dönemden itibaren sorunlar daha da karmaşıklaştı ve Heisenberg izgenin özellikleriyle daha kapsamlı ve daha hırslı bir biçimde ilgilendi. Heisenberg, Kuzey Denizi'ndeki Heligoland Adası'nda saman nezlesinden kurtulmak için uğraşırken, büyük buluşunu ger-

çekleştirdi. Hesaplar epeyce karmaşık görünse de, matematiğin savurduğu toz yatıştığında, bunların matrisler (özel bir biçimde birlikte artan sayı dizileri) diye adlandırılan matematiksel kendiliklerin manipülasyonundan ibaret olduğu ortaya çıktı. Bu nedenle, Heisenberg'in buluşu matris mekaniği olarak bilinir. Matris mekaniğinin altında yatan düşünceler birazdan çok daha genel bir biçimde yeniden karşımıza çıkacak. Şimdilik, matrislerin basit sayılardan farklı olduğuna, yani genelde matrislerin yer değiştirmediğine dikkat etmeliyiz. Bu, eğer A ile B iki matris iseler, AB'nin sonucunun BA'nın sonucuyla daima aynı olmadığı anlamına gelmektedir. Hem 2 çarpı 3'ün hem de 3 çarpı 2'nin 6 olduğu sayıların aksine, matriste çarpım düzeni önem taşır. Matrislerin bu matematiksel özelliğinin, fizik açısından kuantum mekaniğinde hangi niceliklerin eşzamanlı olarak ölçülebileceğiyle bağlantılı bir önem taşıdığı ortaya çıktı. [Kuantum kuramının tam anlamıyla gelişmesi için gerekli olduğu sonradan ortaya çıkan daha ileri düzeyde bir matematiksel genelleme için 4'e bakınız.]

1925 yılında, matrisler, sıradan kuramsal fizikçilere matematiksel açıdan bu kitabın matematikçi olmayan okurlarına görünebileceği denli garip görünmekteydi. Dönemin fizikçilerine (kısmı diferansiyel eşitlikler içeren) dalga hareketleriyle birleştirilmiş matematik daha tanıdık geliyordu. Bu fizik, Maxwell'in geliştirdiği standart klasik fizik tekniklerini kullanmaktaydı. Heisenberg'in buluşunun hemen ardından, farklı görünmesine karşın dalga eşitlikleri matematiğiyle çok daha uyumlu olan bir kuantum kuramı çeşitlemesi belirdi.

Bu ikinci kuantum kuramı açıklaması, olması gerektiği gibi, dalga mekaniği olarak adlandırıldı. Her ne kadar dalga mekaniğine son halini Avusturyalı fizikçi Erwin Schrödinger vermiş olsa da, bu doğrultudaki ilk girişim daha önce genç Fransız aristokrat Prens Louis de Broglie'nin yapıtında [5] mevcuttu. De Broglie, dalgalı yapıdaki ışık aynı zamanda parçacık özellikleri gösteriyorsa, elektronlar gibi parçacıkların da dalga özellikleri göstermesinin beklenebileceği yönündeki cesur varsayımını öne sürdü. De Broglie, bu düşünceyi Planck formülünü genelleştirerek niceliksel bir biçime çevirebilirdi. Planck formülü, enerjinin parçacık özelliğinin dalganın frekans özelliğiyle orantılı olduğunu belirtir. De Broglie, parçacığın başka bir özelliği (iyi tanımlanmış ve kabaca bir parçacığın sahip olduğu sürekli hareketin niceliğine karşılık gelen önemli bir fizik niceliği) olan momentin, benzer bir biçimde, dalganın bir başka özelliği olan dalga boyuyla, Planck evrensel sabitinin de orantılılık sabitiyle bağlantılı olması gerektiğini öne sürdü. Bu eşitlikler, parçacıkları dalgalara ve dalgaları parçacıklara tercüme etmek için bir tür küçük sözlükçe sağladı. De Broglie 1924 yılında bu düşüncelerini doktora tezinde ortaya koydu. Paris Üniversitesi'ndeki yetkililer bu aykırı düşüncelere epey kuşkuyla yaklaştılar; ama, bereket versin ki, Einstein'a danıştılar. Einstein'ın genç adamın dehasını onaması sayesinde ona doktora derecesi verildi. Birkaç yıl içinde, Davisson ile Germer'in Birleşik Devletler'deki ve George Thomson'un İngiltere'deki deneyleri, bir elektron demetinin bir kristal kafesiyle etkileşime girdiğinde ortaya

çıkan girişim örüntüsünün varlığını göstererek elektronların aslında dalga davranışı gösterdiğini doğrulamayı başardı. Louis de Broglie 1929 yılında Nobel Fizik Ödülü'yle mükafatlandırıldı. (George Thomson, J. J. Thomson'un oğluydu. Baba Thomson Nobel Ödülü'nü elektronun bir parçacık olduğunu gösterdiği için alırken, oğlunun elektronun bir dalga olduğunu gösterdiği için almasına sık sık dikkat çekilir.)

De Broglie'nin geliştirdiği bu düşünceler, serbest hareket eden parçacıkların özelliklerinin incelenmesine dayanıyordu. Bütünüyle dinamik bir kurama varmak için, etkileşimlerin serbest hareket eden parçacıklar temelindeki açıklamaya dâhil edilmesine olanak tanıyan daha ileri bir genelleştirme gerekmekteydi. Schrödinger'in çözmeyi başardığı problem budur. Schrödinger, 1926 yılının başlarında, kendi adıyla anılan ünlü eşitliğini yayınladı [6]. Onu bu eşitliğe götüren, optikten alınan bir analojinin kullanılmasıydı.

19. yüzyılda fizikçiler ışığın dalgalardan oluştuğunu düşünmekteydi; ama gerçekte ne olup bittiğini anlamak için nihai dalga devinim hesap tekniklerini her zaman kullanmıyorlardı. Işığın dalga boyu, problemi tanımlayan boyutlara göre küçük ise, hepten daha yalın bir yöntem kullanmak olanaklıdır. Bu, ışığı basit kurallara göre yansıtılan ya da kırılan düz bir çizgi biçiminde devinen ışınlar olarak ele alan geometrik optiğin yaklaşımıydı. Günümüzde fiziğin temel lens ve ayna sistemleri hesapları okullarda tamamen aynı biçimde yapılmaktadır. Hesabı yapanlar dalga eşitliğinin karmaşıklığından dolayı kesinlikle telaşa kapılmamaktalar. Işık için kullanılan ışın optiğinin basitliği, parçacık mekaniğinde çizilen yörüngelerin basitliğine benzemektedir. Schrödinger, parçacık mekaniğinin yalnızca temel dal-

ga mekaniği için bir kestirim olduğu ispatlanırsa, bu dalga mekaniğinin, dalga optiğinden yola çıkıp geometrik optiğe varan düşüncelerin tersine çevrilmesi yoluyla bulunabileceğini savundu. Bu yolla da Schrödinger eşitliğini buldu.

Schrödinger, düşüncelerini, Heisenberg matris mekaniği kuramını fizik komitesine sunduktan birkaç ay sonra yayınladı. Bu sırada 38 yaşında olan Schrödinger, bilim insanı olmayanların kimi zaman öne sürdüğü, kuramsal fizikçilerin gerçek özgün çalışmalarını 25 yaşından önce gerçekleştirdiği iddiasının çarpıcı bir karşı-örneğini ortaya koydu. Schrödinger eşitliği, kuantum kuramının temel dinamik eşitliğidir. Bu eşitlik, oldukça açık bir biçimde, kısmi diferansiyel eşitlik niteliğindedir; aynı zamanda fizikçilere tanıdık gelen ve azımsanmayacak bir matematiksel çözüm teknikleri bataryasına sahip oldukları türden bir eşitliktir. Schrödinger eşitliğinin kullanımı Heisenberg'in tumturaklı matris yöntemlerinden daha kolaydı. İnsanlar bu düşünceleri vakit geçirmeksizin çeşitli özgül fizik problemlerine uyguladılar. Bizzat Schrödinger, kendi eşitliğinden Balmer'in hidrojen izgesi formülünü çıkarmayı başarabildi. Bu hesaplama, eski kuantum kuramının onarılması gerektiği düşüncesini esinleyen Bohr'un hem doğruya ne kadar yaklaştığını hem de ondan ne kadar uzaklaştığını gösterdi. (Açısal devinirlik önemliydi, ama tam olarak Bohr'un önerdiği anlamda değil.)

Kuantum mekaniği

Heisenberg'in ve Schrödinger'in etkileyici bir ilerleme kaydetmiş oldukları çok açıktı. Bu iki fizikçinin yeni

düşüncelerini sunarken izlediği yol ilk bakışta çok farklı görünüyordu. Bundan ötürü, farklı biçimde ifade edilmiş tek bir buluşun mu yoksa iki rakip önermenin mi söz konusu olduğu açık değildi [10'daki irdelemeye bakınız]. Bu yeni düşünceleri, özellikle Göttingen'de Max Born'un ve Cambridge'de Paul Dirac'ın değerli katkılarda bulunduğu önemli bir açıklayıcı çalışma izledi. Çok geçmeden, matematik aracılığıyla ifade edilmesi türlü eşitlik formlarına bürünebilen ve ortak genel ilkelere dayanan tek bir kuramın söz konusu olduğu ortaya çıktı. Bu genel ilkeler, en sonunda, Dirac'ın ilk baskısını 1930'da yapan ve 20. yüzyılın klasik düşün yapıtlarından biri olan *Principles of Quantum Mechanics* (Kuantum Mekaniğinin İlkeleri) adlı yapıtında en şeffaf biçimiyle sergilendi. İlk baskının önsözü aldatıcı biçimde basit bir cümleyle başlar: "Kuramsal fizikteki süreç yöntemleri bu yüzyıl boyunca büyük bir değişim geçirdi." Şimdi, büyük bir değişim geçiren fizik dünyasının doğasının dönüşmüş resmini ele almalıyız.

Tabir yerindeyse kuantum mekaniğini ilk ağızdan öğrendim. Yani Dirac'ın Cambridge'de 30 yıldan daha uzun bir süre boyunca verdiği ünlü kuantum derslerine katıldım. Dersleri izleyenler, yalnızca benim gibi lisans eğitiminin son yılında olanlar değildi; hikâye hakkında kabataslak bilgileri olmasına karşın, haklı olarak, hikâyeyi bir de onun önemli kahramanlarından birinin ağzından dinlemenin bir ayrıcalık olacağını düşünen yaşça daha büyük misafirler de vardı. Dersler Dirac'ın kitabının şablonunu yakından takip etmekteydi. Dersin etkileyici bir yanı, Dirac'ın bu büyük buluşlara sağladığı önemli kişisel katkıdan kesinlikle söz açmamasıydı. Zihninin saflığından ve

amacına bağlılığından ötürü Dirac'ı daha önce bilim azizi diye anmıştım. Bir Bach fügünün ilerleyişi kadar tatmin edici ve görünüşte vazgeçilmez olan dersler, berraklığı ve savlarını açımlarkenki cesametiyle büyüleyiciydi. Dersler herhangi bir retorik hile içermese de, Dirac, dersin başında nispeten teatral bir hava yaratma konusunda kendisine özgürlük tanımıştı.

Dirac bir parça tebeşir alıp onun ikiye böldü. Tebeşirin bir parçasını kürsüsünün bir tarafına, diğerini öbür tarafına koyan Dirac, tebeşirin bir parçasının "burada" ve diğer parçasının ise "orada" yer aldığı klasik bir durumun söz konusu olduğunu ve bunların yalnızca iki olasılık olduğunu söyledi. Buna karşın, tebeşir bir elektronla değiştirildiğinde, kuantum dünyasında yalnızca "burada" ve "orada" değil, bir de bu olasılıkların karışımından oluşmuş bir başka durumlar çokluğu söz konusuydu – biraz "burada" ve biraz "orada". Kuantum kuramı, klasik fizikte birbirlerini karşılıklı olarak dışlamaları beklenen durumların birbirlerine karışmasına imkân verir. Kuantum dünyasını klasik fiziğin gündelik dünyasından ayıran, karşı-sezgiye dayalı bu ekleme olasılığıdır [7]. Fizik dilinde bu yeni olasılığın adı üstdüşüm ilkesidir.

Çift yarık ve üstdüşüm

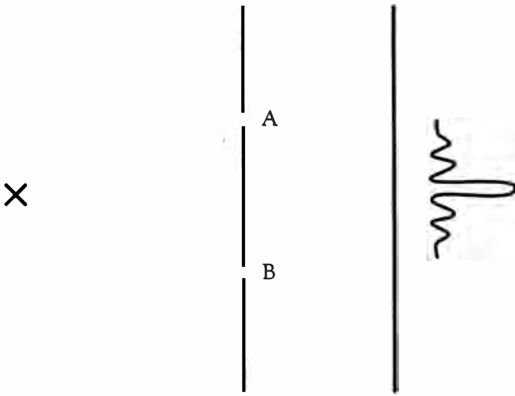
Çift yarık deneyi olarak adlandırılan deney, üstdüşüm varsayımından çıkan köktenci sonuçları çok iyi açıklamaktadır. Sistematik olmayan eğlenceli kitaplarıyla halkın beğenisini kazanan Nobel ödüllü muzip fizikçi Richard Feynman, bir defasında, bu görüngüyü "kuantum meka-

niğinin merkezi" diye betimlemişti. Feynman, kuantum kuramının, tadının ne olduğu ya da hazmedilip hazmedilemeyeceği konusunda kaygılanmaksızın tek bir defada mideye indirilmesi gerektiği görüşündeydi. Bu, ancak çift yarık deneyi gövdeye indirilerek yapılabilirdi, çünkü:

> Gerçekte, o, *yegâne* gizemi içermektedir. Nasıl işlediğini "açıklayarak" gizemi başımızdan defedemeyiz. Size yalnızca nasıl işlediğini *söyleyeceğiz*. Size nasıl işlediğini anlatarak bütün kuantum mekaniğinin temel özelliklerini anlatmış olacağız.

Böyle bir tanıtımın ardından, okuyucu, kesinlikle merak uyandıran bu görüngüyle ciddi bir biçimde ilgilenmek isteyecektir. Bu deney, bir kuantum birimleri kaynağını, sözgelimi düzenli bir parçacıklar akışını ateşleyen bir elektron tabancasını gerektirir. Bu parçacıklar A ve B diye iki yarığın olduğu bir perdeye çarparlar. Yarıklı perdenin arkasında elektronların gelişini kaydeden algılayıcı bir perde vardır. Bu perde, değen her elektronun iz bırakacağı büyük bir fotoğraf tabakası olabilir. Elektron tabancasından düzenli bir biçimde yalnızca bir tane elektron çıkması için aygıtın çıkış oranı ayarlanır. Sonra ne olduğu gözlenir.

Elektronlar algılayıcı perdeye tek tek varır ve her bir elektron için onun darbe noktasını kaydeden bir iz görüntüsü belirir. Bu görüntü, elektronun parçacık biçiminde davrandığını açıkça göstermektedir. Buna karşın, algılayıcı ekranda çok sayıda iz biriktiğinde, bunların ortaklaşa yarattığı örüntü, tanıdık girişim etkisinin bir biçimini gösterir. Perdede çok sayıda elektron izinin birikmiş olduğu



3. Resim. Çift yarık deneyi. [Diffraction pattern: kırınım örüntüsü]

bölgeye karşılık gelen iki yarık arasındaki orta noktanın karşısında yoğun bir karanlık nokta vardır. Bu merkez bandın diğer yanında, bu konumlara ulaşan ve ulaşmayan elektronlara karşılık gelen dalgalı ışık ve azalan karanlık bantları vardır. Böyle bir kırınım örüntüsü (fizikçiler bunları girişim etkileri olarak adlandırır) elektronların dalga biçiminde davrandıklarının aşikâr bir izidir.

Bu görüngü, elektron dalga/parçacık ikiliğinin derli toplu bir örneğidir. Perdeye ulaşan elektronlar parçacık davranışı gösterirken, ortaya çıkan ortak girişim örüntüsü dalga davranışı göstermektedir. Ama, bu söylediğimizden daha ilginç bir şey söz konusudur. Bölünmez tek bir elektron aygıtın içinden geçerken algılayıcı perdeye varmak için hangi yarıktan geçmektedir sorusunu sorarak ne olup bittiğini daha derinlemesine araştırabiliriz. Elektronun üsteki A

yarığından geçtiğini varsayalım. Eğer elektron gerçekten A yarığından geçtiyse, alttaki B yarığı ya gerçekten ilişkisizdir ya da geçici olarak kapatılmış olmalıdır. Ne var ki, yalnızca A açıkken, elektron büyük bir olasılıkla uzak perdenin ortasına varamayacak, bunun yerine, büyük bir olasılıkla A'ya karşılık gelen noktaya ulaşacaktır. Bu doğru olmadığı için, elektronun A'dan geçmediği sonucuna varırız. Savı tersyüz edersek, elektronun B'den de geçmediği sonucuna varırız. Öyleyse ne olmuştur? Muhteşem ve iyi insan Sherlock Holmes, imkânsızı elediğinizde geriye kalanın, hiç olası görünmese de, doğru olması gerektiğini söylemeyi çok severdi. Holmes'un bu ilkesine başvurmak, bizi bölünmez elektronun *her iki yarıktan geçtiği* sonucuna götürmektedir. Klasik sezgi bakımından bu anlamsız bir sonuçtur. Buna karşın, kuantum kuramının üstdüşüm ilkesi bakımından oldukça çok şey ifade etmektedir. Elektronun devinim durumu, A'dan geçiş ve B'den geçiş durumlarının toplamıdır.

Üstdüşüm ilkesi, kuantum kuramının iki genel özelliğini içerimler. Bu özelliklerden biri, fiziksel süreç boyunca ne olduğunun açık bir betimlemesini vermenin artık olanaksız olduğudur. Yapmakta olduğumuz gibi, gündelik (klasik) dünyada yaşayarak bölünmez bir parçacığın iki ayrı yarıktan geçtiğini hayal etmek bizim için olanaksızdır. Diğer sonuç, bir gözlem yaparken tam olarak ne olacağını kestirmenin bizim için artık olanaksız olduğudur. Elektronun hangi yarıktan geçtiğini belirleyebilmek için her iki yarığın yanlarına birer algılayıcı koyarak çift yarık deneyini biraz değiştirdiğimizi varsayalım. Deneyde yapılan bu değişikliğin iki sonuca vardığı görülecektir. Bu sonuçlardan biri, elektronun bazen A yarığının, bazen de B yarığının yakınında algılandığıdır.

Herhangi bir özel durumda elektronun nerede olduğunu kestirmek olanaksız olacaktır; ama, çok uzun bir deneme dizisinin ardından, iki yarığa bağlı görece olasılıkların 50'ye 50 olacağı bulunacaktır. Bu, genel bir kuantum özelliğini, yani kuantum kuramında ölçüm sonuçlarına ilişkin kestirimlerin belirlenimci değil, istatiksel olduğunu ifade etmektedir. Kuantum kuramı, kesinliklerden çok, olasılıklarla ilgilenir. Deneyde yapılan değişikliğin bir başka sonucu, arka perdedeki girişim örüntüsünün yok edilmesi olacaktır. Artık elektronlar algılayıcı perdenin orta noktasına yönelmeyecekler, A'nın karşısına varanlar ve B'nin karşısına varanlar olarak eşit bir biçimde ayrılacaklardır. Bir başka deyişle, davranış, neyi aramayı seçtiğinize bağlıdır. Parçacığa ilişkin soru (hangi yarık?) parçacıkla ilgili yanıtı verirken, dalgaya ilişkin soru (yalnızca algılayıcı perdede biriken son örüntüyle ilgiliyse) dalgaya ilişkin bir yanıt verir.

Olasılıklar

Kuantum kuramının olasılıkçı karakterine açık bir biçimde ilk kez vurguda bulunan kişi Göttingen'de çalışan Max Born oldu. Born, bu başarısından dolayı hak ettiği Nobel Ödülü'nü 1954 kadar geç bir tarihte alacaktı. Dalga mekaniğinin gelişmesi tanıdık soruları gündeme getirmişti: Neyin dalgası? Başlangıçta, bunun maddenin dalgasına ilişkin bir soru olabileceği varsayımı yönündeki eğilim ağır bastığından, dalga biçiminde yayılanın elektronun kendisi olduğu düşünüldü. Born çok geçmeden bu düşüncenin işe yaramadığını fark etti. Bu düşünce parçacık özellikleriyle

uyuşmamaktaydı. Schrödinger eşitliği, dalgaların olasılığını betimliyordu. Bu gelişme kuantum kuramının bütün öncülerinin hoşuna gitmedi; birçoğu klasik fiziğin belirlenimci içgüdülerini bütün güçleriyle muhafaza ettiler. Olasılıkçı karakteriyle sunulan kuantum fiziği, hem Broglie'yi hem de Schrödinger'i hayal kırıklığına uğrattı.

Olasılık yorumu, ölçümlerin anlık ve süreksiz değişim durumları olmaları gerektiğini içerimler. Eğer "buradan", "oradan" ve belki de "her yerden" yayılması olası bir elektronun konumu ölçülüp "burada" olduğu saptanmışsa, olasılık dağılımı, fiilen ölçülen konum "burada"da yoğunlaşıp aniden değişmek zorundadır. Dalga işlevine dayanılarak hesaplandığından ötürü, olasılık dağılımının da süreksiz bir biçimde değişmesi gerekir. Bu, Schrödinger eşitliğinin içerimlemediği bir davranıştır. Dalga paketinin çöküşü diye adlandırılan bu ani değişim görüngüsü, kurama dışarıdan dayatılmış, fazladan bir durumdu. Bir sonraki bölümde, ölçme sürecinin kuantum kuramının nasıl anlaşılması ve yorumlanması gerektiği konusunda nasıl zihinleri sürekli karıştırdığını göreceğiz. Bu sorun, Schrödinger gibi birinde yalnızca kafa karışıklığına neden olmadı. Onu kızdırıp şunu söylemesine yol açtı: Düşüncelerimin "lanet kuantum sıçramasına" varacağını bilseydim, kendi eşitliğimi bulmayı istemezdim!

Gözlenebilir öğeler

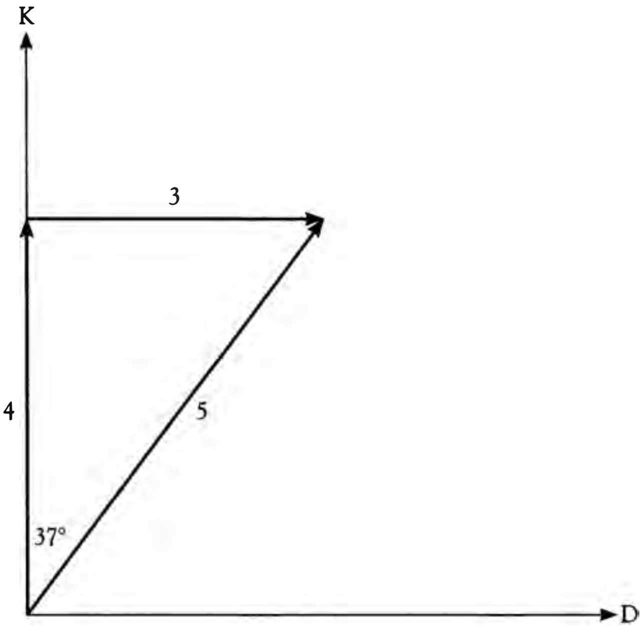
(Okuyucuya uyarı: Bu bölüm, öğrenilmeye değer olsalar da, hazmedilmesi biraz gayret gerektirecek bazı yalın

matematiksel düşünceler içermektedir. Ana metinde matematiğe şöyle bir değinme tehlikesini göze alan yalnızca bu altbölümdür. Bu altbölümün –kavranmasındaki güçlükten dolayı– matematikçi olmayanlara bir yardımı dokunmayacağı için üzgünüm.)

Klasik fizik açık ve belirli bir dünyayı betimler. Kuantum fiziği düzensiz ve belirsiz bir dünyayı betimler. Biçimciliğe (kuramın matematiksel ifadesine) göre, bu niteliklerin, kuantumun üstdüşüm ilkesinin klasik fizik açısından kesinlikle birbirine karışmaması gereken durumların birbirine karışmasına izin vermesinden doğduğunu gördük. Karşı-sezgiye dayalı yalın toplanabilirlik ilkesi, vektör uzayları diye adlandırılan doğal bir matematiksel ifade biçimi alır [7].

Olağan uzayda vektör bir ok, belirli bir yönü gösteren, belirli bir uzunluğu olan bir şey olarak düşünülebilir. Oklar birbirlerine, basitçe, birinin diğerini izlemesiyle eklenebilir. Sözgelimi, kuzey yönündeki dört millik bir oku doğu yönündeki üç millik bir ok izlediğinde, 37° kuzeydoğu yönünde beş millik bir ok toplamı ortaya çıkar (bakınız 4. resim). Matematikçiler bu düşünceleri çok boyutlu uzaylara doğru genelleştirebilirler. Bütün vektörlerin ortak temel özelliği, birbirlerine eklenebilmeleridir. Nitekim, vektörler, kuantum üstdüşüm ilkesinin matematiksel karşılığıdırlar. Burada ayrıntılarla ilgilenmemiz gerekmiyor, ama terminolojiyi iyi bilmek daima yararlı olduğundan, Hilbert uzayı diye adlandırılan oldukça sofistike bir vektör uzayı formunun kuantum kuramına matematiksel bir seçim aracı sağlaması üzerinde durulmaya değer bir konudur.

İrdelememiz şimdiye kadar devinim durumları üzerinde durdu. Devinim durumlarının, başlangıçtaki malzemeyi

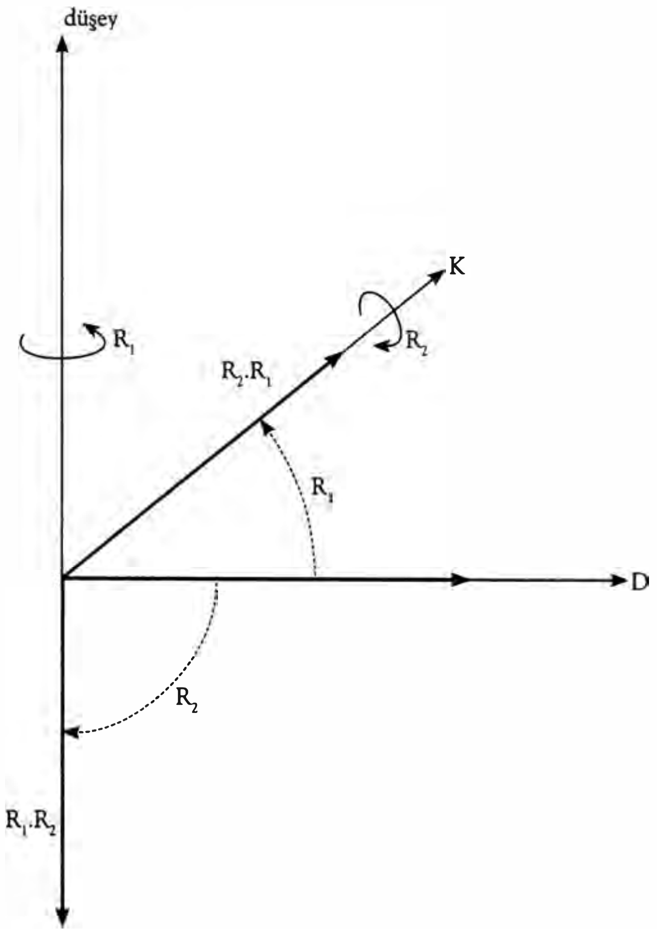


4. Resim. Eklenen vektörler.

deney için hazırlamanın özel yollarından doğduğu düşünülebilir: Bir elektron tabancasından elektronların ateşlenmesi; ışığın özel bir optik sisteminin içinden geçmesi; parçacıkların özel bir elektrik ve manyetik alanlar dizisi tarafından saptırılması ve benzerleri. Kuantum kuramının tanımlanamazlığı, durumun klasik fizikteki gibi açık ve yalın olmayacağı anlamına gelse de, durum, hazırlanan sistem için "durum ne ise" o olarak düşünülebilir. Fizikçi bir

şeyi (elektronun tam olarak nerede olduğunu) daha kesin bir biçimde bilmek istiyorsa, sisteme deneysel bir müdahale içeren bir gözlemde bulunması zorunlu olacaktır. Sözgelimi, deneyci, bir elektronun konumu ya da devinirliği gibi özel bir dinamik niceliği ölçmek isteyebilir. Bu durumda, şu biçimsel soru gündeme gelir: Eğer durum bir vektörle gösterilmekteyse, ölçülebilen gözlenebilirler nasıl gösterilmelidirler? Bu sorunun yanıtı, Hilbert uzayında işleyen operatörlerin terimlerindedir. Nitekim, matematiksel biçimciliği fiziğe bağlayan bu şema, vektörler durumlara karşılık gelirler belirlemesinin yanı sıra, operatörler gözlenebilirlere karşılık gelirler belirlemesini de içermektedir [8].

Genel düşünce, bir operatörün bir durumu bir başka duruma dönüştüren bir şey olduğudur. Dönme operatörleri bunun basit bir örneğidirler. Olağan üç boyutlu uzayda, (sağ elli dönme kuralı anlamında) dikey eksen etrafındaki 90°'lik bir dönme, doğuyu gösteren bir vektörü (onu bir ok olarak düşünün) kuzeyi gösteren bir vektöre (oka) döndürür. Operatörlerin önemli bir özelliği, genellikle birbirleriyle yerlerinin değiştirilemez olmasıdır; yani gerçekleşme sıraları önemlidir. İki operatör düşünelim: R_1 dikey bir eksen etrafında 90°'lik bir dönme; R_2 kuzeyi gösteren yatay eksen etrafında 90°'lik (yine sağdan sola) bir dönmedir. Bunları doğuyu gösteren bir oka, R_2'nin R_1'i izlediği bir sırayla uygulayalım. R_1 bu oku kuzeyi gösteren bir oka dönüştürür, bu sonradan R_2 tarafından değiştirilmez. Bu sırayla gerçekleştirilen iki işlem, R_2, R_1 sonucu olarak gösterilir, çünkü İbran ve Arap kökenli gibi operatörler de daima sağdan sola doğru okunur. Bu operatörlerin tersine bir sırayla uygulanması doğu yönündeki oku aşağıyı göste-



5. Resim. Yer değişmeyen dönmeler.

ren (R_2'nin etkisi) bir oka dönüştürür, bu sonradan değişmeden kalır (R_1'in etkisi). R_2, R_1, kuzeyi gösteren bir okla ve R_1, R_2, aşağıyı gösteren bir okla sonuçlandığı için, bu iki sonuç birbirlerinden oldukça farklıdırlar. Sıra önemlidir – dönüşler birbirleriyle değiştirilemezler.

Matematikçiler, matrislerin operatörler olarak da düşünülebileceklerini ve dolayısıyla Heisenberg'in kullandığı matrislerin yer değiştirmezliğinin bu genel operatör vasfının özel bir örneği olduğunu onaylayacaklardır.

Bütün bunlar oldukça soyut görünse de, yer değiştirmezliğin fiziğin önemli bir özelliğine karşılık geldiğini göstermektedir. Bunun nasıl gerçekleştiğini görmek için ilk önce gözlemlenebilir öğelerin operatör biçimciliğinin deneylerin fiili sonuçlarıyla nasıl ilişkilendiği belirlenmelidir. Operatörler bütünüyle sofistike matematiksel kendilikler olsalar da, ölçümler daima herhangi bir şeyin 2.7 birimi gibi sofistike olmayan sayılar aracılığıyla ifade edilirler. Soyut bir kuram fiziksel gözlemleri anlamlı kılmaktaysa, (gözlemlerin sonuçları demek olan) sayıları operatörlerle (matematiksel biçimcilikle) birleştirmenin bir yolu olmalıdır. Bereket versin ki, matematik bu meydan okumayla başa çıkmaktadır. Bu bağlamdaki anahtar düşünceler *özvektörler* ve *özdeğerler*dir [8].

Bir vektörü etkileyen bir operatör bazen vektörün yönünü değiştirmez. Bunun bir örneği, dikey vektörde değişiklik yaratmayan dikey eksen etrafındaki dönmedir. Bir başka örnek, dikey yönde esneme işlemi olacaktır. Bu işlem, dikey vektörün yönünü değiştirmese de, uzunluğunu değiştirecektir. Esneme iki katına çıkarma etkisine sahipse, dikey vektörün uzunluğu çarpı 2 olur. Daha genel

terimlerle, bir O operatörü tikel v vektörünü kendisinin λ katına çıkarıyorsa, v'nin λ özdeğerine sahip O'nun özvektörü olduğunu söylemekteyiz. Temel düşünce, özdeğerlerin (λ) sayıları özel bir operatör (O) ve özel bir durumla (v) birleştirmenin matematiksel bir yolunu verdiğidir. Kuantum kuramının genel ilkeleri, (bir özdurum diye de adlandırılan) bir özvektör, fiziksel olarak gözlemlenebilir bir nicelik olan O'nun ölçülmesinin *kesinlikle* λ sonucunu vereceği bir duruma karşılık gelmelidir koşulunu içerir.

Bu kuraldan çok sayıda önemli sonuç doğmaktadır. Bunlardan biri, kuralın karşıtı bir sonuç olan, özvektör olmayan birçok vektör bulunduğundan ötürü O'nun ölçülmesinin kesinlikle herhangi bir özel sonuç vermeyeceği birçok durumun söz konusu olacağıdır. (Matematiğe başvurmaksızın O'nun farklı özdeğerlere karşılık gelen iki özdurumunun üstdüşümünün, O'nun yalın bir özdurumu olamayan bir durum vereceğini görmek oldukça kolaydır.) Dolayısıyla, O'nun bu gibi durumlarda ölçülmesi, farklı ölçüm girişimlerinde farklı türden yanıtlar çeşitliliği sunmalıdır. (Kuantum kuramının o bildik olasılıkçı niteliği yine ortaya çıkıyor.) Elde edilen sonuç ne olursa olsun, izleyen durum ona karşılık gelmelidir; yani vektör, O'nun özvektörü haline gelmek için hemen değişmelidir. Bu, dalga paketinin çöküşünün sofistike bir biçimidir.

Bir başka önemli sonuç, hangi ölçümlerin karşılıklı biçimde uyumlu olabilecekleriyle, yani hangi ölçümlerin aynı zamanda yapılabilecekleriyle ilişkilidir. O_1'in ve O_2'nin eşzamanlı ölçümünün olanaklı olduğunu ve ölçümün sırasıyla λ_1 ve λ_2 sonuçlarını verdiğini varsayalım. Gözlemlerin sırasının tersine çevrilmesi yalnızca λ'lerin

durum vektörüyle çarpıldığı sırayı tersine çevirirken, ölçümün yukarıdaki sırayla yapılması durum vektörünü ilk önce λ_1'le, ardından λ_2 ile çarpar. λ'ler yalnızca basit sayılar olduklarından, bu sıra önemli değildir. Bu, durum vektörünü etkileyen $O_2.O_1$ ile $O_1.O_2$ özdeş etkilere sahip oldukları için, operatör sırasının önemli olmadığını içerimler. Bir başka deyişle, eşzamanlı ölçümler, yalnızca birbiriyle yer değiştirebilen operatörlere karşılık gelen gözlenebilir öğeler için karşılıklı olarak uyumlu olabilirler. Tersinden söylersek, yer değiştirmeyen gözlenebilir öğeler eşzamanlı ölçülemezler.

Burada, kuantum kuramının o bildik bulanıklığının kendisini yine gösterdiğini görüyoruz. Klasik fizikte deneyci istediği zaman istediği ölçümü yapabilir. Fiziksel dünya, bilim insanın potansiyel olarak her şeyi gören gözlerinin önünde uzanmaktadır. Kuantum kuramında, aksine, fizikçinin bakışını kısmen sınırlayan bir peçe vardır. Kuantum kendiliklerinin bilgisine ulaşmamız klasik fiziğin bilgikuramsal olarak varsaydığından çok daha sınırlıdır.

Vektör uzaylarıyla matematiksel flörtümüz sona erdi. Başı dönen okuyucu, kuantum kuramında sadece operatörleri birbiriyle yer değiştiren gözlenebilir öğelerin eşzamanlı bir biçimde ölçülebileceği olgusuna tutunmalıdır.

Belirsizlik ilkesi

Heisenberg, bütün bunların ne anlama geldiğini, ünlü belirsizlik ilkesini formüle ettiği 1927 yılında önemli ölçüde açıklığa kavuşturdu. Heisenberg, kuramın ölçüm

yoluyla neyin bileneceğine izin verdiğini belirlemesi gerektiğini fark etti. Heisenberg, biraz önce ele aldığımız türden matematiksel savlarla değil, kuantum mekaniğinin fizik içeriğini açıklamaya çalışan idealleştirilmiş "düşünce deneyleri"yle ilgilendi. Bu düşünce deneylerinden biri, y-ışını mikroskobu diye adlandırılan mikroskobun incelenmesini içeriyordu.

Bu düşünce deneyinin amacı, bir elektronun konumunun ve devinirliğinin ilke olarak nasıl kesin bir biçimde ölçülebileceğini bulmaktır. Kuantum mekaniğinin kurallarına göre, mütekabil operatörler yer değiştiremezler. Dolayısıyla, kuram gerçekten geçerliyse, aynı anda hem konumu hem de devinirliği keyfi bir kesinlikle bilmek olanaklı olmamalıdır. Heisenberg bunun niçin böyle olduğunu fizik terimleri aracılığıyla anlamak istedi. İşe elektronun konumunu ölçemeye çalışarak başlayalım. İlke olarak bunun yapmanın bir yolu, elektron üzerine ışık tutup bir mikroskop aracılığıyla onun nerede olduğuna bakmaktır. (Bunların *düşünce* deneyleri olduklarını hatırlayın.) Günümüzde optik araçlar nesnelerin yerlerinin ne kadar kesinlikle belirlenebileceğine sınırlamalar getiren sınırlı bir ayrıştırma gücüne sahiptirler. Kesinlik, en iyi ışığın dalga boyu kullanılarak artırılabilir. Kuşkusuz, kesinliği artırmanın bir yolu –yüksek frekanslı (kısa dalga boylu) ışınım oldukları için y-ışınlarının da dâhil olduğu– daha kısa dalga boylarını kullanmak olacaktır. Gene de, bu hile, ışınımın parçalı karakterinin neden olduğu bir sonuca bedellenir. Elektronun görülmesi için mikroskoba en azından bir foton yönlendirmelidir. Planck'ın formülü, daha yüksek frekansın fotonun daha fazla enerji taşıyacağı anlamına gel-

diğini belirtmektedir. Sonuç olarak, küçülen dalga boyu, elektronu deviniminin fotonla çarpışmasıyla denetlenemez biçimde bozulması yoluyla tabi kılar. Bu durum, konum ölçümünden sonra elektronun devinirliğinin ne olabileceğine ilişkin bilgimizin giderek azalacağını içerimler. Konum ölçümünün artan kesinliği ile devinirlik bilgisinin azalan kesinliği arasında kaçınılmaz bir denge söz konusudur. Bu olgu, belirsizlik ilkesinin temeldir: Aynı anda hem konumun hem de devinirliğin mükemmel bilgisine sahip olmak olanaklı değildir [9]. Daha betimleyici bir dille, elektronun nerede olduğu bilinebildiğinde ne yaptığı bilenemez ya da ne yaptığı bilinebildiğinde nerede olduğu bilenemez. Klasik fiziğin yarım yamalak bir bilgi sayacağı bu bilgi, kuantum dünyasında bizim ulaşabileceğimiz en iyi bilgidir.

Bu yarım bilgi, kuantumun ayırt edici bir özelliğidir. Gözlenebilir öğeler bilgikuramsal olarak birbirlerini dışlayan çiftler halinde belirir. Bu davranışın gündelik yaşama ait bir örneği müzik terimleriyle verilebilir. Bir notanın çalındığı anı ve perdesinin ne olduğunu aynı anda kesin bir biçimde belirlemek olanaklı değildir. Çünkü, bir notanın perdesinin belirlenmesi ses frekansının çözümlenmesini gerektirir ve bu da kesin bir hesap yapmadan önce çeşitli salınımlar sürdüğü müddetçe onun dinlenmesini gerektirir. Bu sınırlamayı dayatan sesin dalga niteliğidir ve –kuantum kuramının ölçüm sorunları dalga mekaniğinin bakış açısından irdelense bile– tamamen benzer kaygılar yeniden belirsizlik ilkesine götürecektir.

Heisenberg'in buluşunun ardında ilginç bir insani hikâye vardır. Heisenberg Kopenhag'taki enstitüde çalı-

şırken kurumun başkanı Niels Bohr'du. Genç Heisenberg, sonu gelmeyen tartışmaları seven Bohr'un gözde sohbet arkadaşlarındandı. Aslında, Bohr'un bitmek bilmez derin tartışmaları bir süre sonra genç meslektaşının zihnini başka tarafa yöneltti. Heisenberg, Bohr'un kayak tatili nedeniyle ortalıkta olmamasının sağladığı fırsatı belirsizlik ilkesi üzerine yazdığı makalesini bitirmek için kullanmaktan hoşnuttu. Heisenberg, ihtiyar geri dönmeden önce makalesini yayımlamak için acele edip dikkatsiz davrandı. Buna karşın, Bohr geri döndüğünde Heisenberg'in yaptığı bir hatayı fark etti. Bereket versin ki, bu hata düzeltilebilir bir hataydı ve düzeltilmesi de nihai sonucu etkilemedi. Bu küçük hata, optik araçların ayrıştırma gücüne ilişkin bir yanlıştı. Heisenberg bu konuda daha önce de benzer bir sorun yaşamıştı. Heisenberg doktora çalışmasını eski kuantum kuramının önde gelen isimlerinden biri olan Arnold Sommerfeld'in yönetimi altında yürütmüştür. Parlak bir kuramcı olan Heisenberg, çalışmalarının bir parçası olması gerektiği varsayılan deneysel çalışma için pek zahmete girmemişti. Sommerfeld'in deney arkadaşı Wilhelm Wien buna dikkat çekmişti. Genç adamın kibirli davranışına kızan Wien onu sözlü bir sınavdan geçirmeye karar verdi. Optik araçların ayrıştırma gücünü hesaplamasını isteyerek Heisenberg'i kesin bir biçimde köşeye sıkıştırdı! Sınavdan sonra, Wien, bu durumun Heisenberg'in başarısız olduğunu gösterdiğini iddia etti. Sommerfeld ise, kesinlikle (ve haklı olarak), Heisenberg'in en üst dereceyle geçmesi gerektiğini savundu. Sonunda bir uzlaşmaya varılması gerekti ve geleceğin Nobel Ödülü sahibine olabilecek en alt dereceden olsa da doktorası verildi.

Olasılık genlikleri

Kuantum kuramında olasılıklar, olasılık genlikleri diye adlandırılan şeye dayanılarak hesaplanır. Burada, matematiğin talep ettiği gibi tam bir irdeleme ortaya konulmayacak; ama okuyucunun farkında olması gereken şeylerin iki boyutu söz konusudur. Bunlardan biri, genliklerin karmaşık sayılar oldukları, yani yalnızca basit sayıları değil, aynı zamanda –1'in "sanal" kare kökü *i*'yi de içerdikleridir. Aslında, karmaşık sayılar kuantum kuramının biçimciliğine özgüdür. Bunun nedeni, karmaşık sayıların I. Bölüm'de girişim görüngüsü irdelenirken göndermede bulunulan dalgaların bir boyutunu temsil etmenin çok uygun bir yolunu sağlamasıdır. Dalgaların evreleri, iki dalga dizisinin birbirleriyle uyumlu mu yoksa uyumsuz mu olduklarına bağlıdır. Karmaşık sayılar, bu "evre ilişkilerini" matematik yoluyla ifade etmenin doğal ve uygun bir yolunu sağlar. Buna karşın, kuram, gözlem sonuçlarının (özdeğerlerin) *i* içeren terimler tarafından kirletilmesinin önüne geçmeyi sağlamakta dikkatli olmalıdır. Bunun başarılması, gözlenebilir öğelere karşılık gelen operatörlerin, matematikçilerin "Hermisyen" olmak diye adlandırdıkları kesin bir koşulu yerine getirmesini gerektirir [8].

Olasılık genliklerinin ikinci boyutu hakkında, en azından tartışmakta olduğumuz kuramın matematiksel aygıtının bir parçası olarak, irdelediğimiz olasılık hesaplamalarının durum vektörleri ile gözlenebilir operatörlerin bir birleşimini gerektirdiğini söylememiz gerekiyor. Fizik açısından en dolaysız öneme sahip şey (bu tür birleşimlere verilen adla) "matris öğeleri" olduğu ve bunlar da

durum-temelli-gözlenebilir "sandviçler" diye adlandırılabilecek şeyler tarafından biçimlendirildikleri için, fiziğin zaman bağımlılığı, durum vektörlerinde mevcut bir zaman bağımlılığına ya da gözlenebilir öğelerde mevcut bir zaman bağımlılığına atfedilebilir. Bu gözlem, görünüşteki farklılıklarına rağmen, Heisenberg'in ve Schrödinger'in kuramlarının nasıl olup da gerçekten tam anlamıyla özdeş bir fiziğe karşılık geldiğinin ipucunu sunmaktadır. Bu kuramların görünüşte birbirlerine benzememeleri, Heisenberg bütün zaman bağımlılığını operatörlere atfederken, Schrödinger'in bunu bütünüyle durum vektörlerine atfetmesinden kaynaklanmaktadır.

Anlamlı olmaları için artı sayı olmaları gereken olasılıkların kendileri, genliklerden ("katsayının karesi" diye adlandırılan) bir tür kare alma yoluyla hesaplanır. Bu hesaplama, daima karmaşık genlikten bir artı sayıyı verir. Ayrıca, bütün olasılıklar birbirine eklendiklerinde toplamlarının 1 (kesinlikle olması gereken bir şey!) olmasını sağlayan ("normalleştirme" diye adlandırılan) bir ölçeklendirme koşulu da söz konusudur.

Tamamlayıcılık

Bütün bu harika buluşlar günışığına çıkarken, Kopenhag ne olup bittiğine ilişkin değerlendirmelerin yapıldığı ve yargıların üretildiği bir merkez haline gelmişti. Bu dönem itibariyle, Niels Bohr, artık teknik ilerlemelere ayrıntılı katkılar sağlamıyordu. Buna karşılık, yorumsal konularla etraflıca ilgilenmeyi sürdüren Bohr, öncü makaleler

yazan genç ilerlemecilerin keşiflerini bütünlüklü ve ayırıcı bir dikkatle irdeleyen kişiydi. Kopenhag, yeni bir düşünsel kuantum mekaniğine ait önerilerin değerlendirilmek ve onay görmek için sunulduğu, filozof krala ait mahkemeydi.

Bohr, baba figürü rolüne ilaveten, yeni kuantum kuramı için içgörülü bir açıklama önerdi. Bu açıklama, onun tamamlayıcılık anlayışının biçimine büründü. Kuantum kuramı, birtakım alternatif düşünme biçimleri önerdi. Sürecin bütün konumların ya da bütün döngülerin ölçülmesine dayandırılabilecek alternatif temsilleri ve ayrıca kendilikleri dalgalardan ya da parçacıklardan hareketle düşünmek arasında bir ikilik söz konusuydu. Bohr, bu alternatif çiftlerin çatışmaktan çok birbirini tamamladığını, aynı oranda ciddiye alınmaları gerektiğini ve bunda da hiçbir çelişki olmayacağını vurguladı. Ya bir dalgayla (bir girişim örüntüsü) yanıtlanacak bir dalga sorusunun sorulduğu bir dalga deneyi (çift yarık) düzenlersiniz ya da bir parçacıkla (iki yarığa karşılık gelen iki etki alanı) yanıtlanacak bir parçacık sorusunun sorulduğu bir parçacık (elektronun hangi yarıktan geçtiğinin belirlenmesi) deneyi düzenlersiniz.

Bir sonraki bölümün göstereceği gibi, tamamlayıcılık, bütün yorumsal sorunları kesin biçimde çözmediyse de, açıkça yararlı bir düşünceydi. Bohr yaşlandıkça felsefi meselelerle giderek daha fazla ilgilendi. Bohr, kuşkusuz, büyük fizikçiydi; ama, bana öyle geliyor ki, amatörce uğraştığı felsefe alanında gözle görülebilir bir biçimde daha az yetenekliydi. Bohr'un kapsamlı ve bulanık düşüncelerini çözümlemek için sonradan birçok kitap yazıldı. Bu kitapların çoğu, Bohr'un birbirleriyle uyuşmayan bir felsefi

konumlar çeşitliliği sunduğu sonucuna ulaştı. Muhtemelen, bu sonuç, Bohr'u fazla şaşırtmamıştır, çünkü o bir şeyi açık biçimde söyleyebilmek ile o şeyin derin ve söylenmeye değer bir şey olması arasında bir tamamlayıcılık olduğunu söylemekten hoşlanırdı. Tamamlayıcılığın kuantum kuramıyla (sorunun deneyden kaynaklandığı ve onu anlaşılır kılan etraflı bir kuramsal çerçeveye sahip olduğumuz) ilişkisi, tamamlayıcılık anlayışının hoşa giden her paradoksal eşlemeyi "temellendirmek" için kullanılabilirmiş gibi başka disiplinlere kolayca ihraç edilmesine izin vermez. Tamamlayıcılığın o eski belirlenimcilik ve özgür istenç sorununa insan doğasıyla bağlantılı bir ışık tutabileceğini öne sürdüğünde Bohr'un tehlikeli bir biçimde bu durumun kıyısına geldiğini düşünebiliriz. Daha derin felsefece düşünmeyi son bölüme kadar erteleyeceğiz.

Kuantum Mantığı

Kuantum kuramından, konum ve devinirlik gibi fizik terimlerini kavrayışımızı çarpıcı bir yolla değiştirmesini rahatlıkla bekleyebiliriz. Kuantum kuramının "ve" ile "ya da" gibi küçük mantık terimlerini düşünüş biçimimizi etkilemiş olması daha da şaşırtıcıdır.

Aristoteles'in ve Clapham otobüsünün tepesindeki adamın tasarladığı klasik mantık, mantığın dağıtım yasasına dayanır. Eğer size Bill'in kızıl saçlı olduğunu ve onun evde ya da barda olduğunu söylersem, siz kızıl saçlı Bill'i evde ya da barda bulmayı umarsınız. Zararsız gibi gözüken bu sonuç, biçimsel olarak, üçüncü olasılığı dışlayan

Aristotelesçi yasaya dayanmaktadır: "evde olmak" ve "evde olmamak" arasında bir orta terim yoktur. İnsanlar 1930'lu yıllarda kuantum dünyasında durumun farklı olduğunu fark etmeye başladılar. Bir elektronun yalnızca "burada olması" ve "burada olmaması" gerekmez, "burada olması"nın ve "burada olmaması"nın üstdüşümleri demek olan sayısız başka durum da söz konusudur. Bu, Aristoteles'in hayal etmediği bir orta terimi oluşturmaktadır. Sonuçta, ayrıntıları Garret Birkhoff ve John von Neumann tarafından geliştirilen ve kuantum mantığı diye adlandırılan özel bir mantık ortaya çıkmıştır. Felsefecilerin kendilerince evirip çevirdikleri bir düşünce olan bu mantık, "doğru" ve "yanlış"a ilaveten olasılıkçı "belki" yanıtını da kabul ettiğinden ötürü, kimi zaman üç değerli mantık diye adlandırılmaktadır.

III. Bölüm

ORTAMI BULANDIRAN ZİHİN KARIŞIKLIKLARI

Modern kuantum kuramı bulunduğu sırada atomların ve ışınımın davranışına ilişkin fizik problemleri gündemin ön sıralarındaydı. Bu ilk buluş dönemini, 1920'lerin sonlarında ve 1930'ların başlarında yeni düşüncelerin bir başka büyük fiziksel görüngüler çeşitliliğine uygulandığı sürekli ve hararetli bir iyileştirme dönemi izledi. Sözgelimi, biraz sonra, kuantum kuramının elektronların kristal katılarda nasıl davrandığı konusunda önemli ve yeni bir anlayış ortaya koyduğunu göreceğiz. Bir keresinde, Paul Dirac'ın bu hızlı gelişme döneminden "ikinci sınıf insanların birinci sınıf iş çıkardığı" bir dönem diye bahsettiğini duymuştum. Eğer bu sözcükler başka birinin ağzından çıkmış olsaydı, kabul edilmesi neredeyse imkânsız, aşağılayıcı bir yorum olarak görülebilirdi. Ama Dirac söz konusuysa kesinlikle aşağılayıcı değildir. Dirac hayatı boyunca söylemek istediğini süslemeksizin ve doğrudan söylediği, basit ve sade bir ifade tarzına sahipti. Onun betimlemesi, yalnızca temel

içgörülere dayanan kavrayışın zenginliğini aktarmak niyetindedir.

Kuantum düşüncelerinin başarıyla uygulanışı süreklilik gösterdi. Nitekim, artık kuramı kuarkların ve gluonların davranışlarını incelerken de aynı etkililikte kullanmaktayız. Nükleer maddenin bu bileşenlerinin kuantumun öncülerinin 1920'lerde üzerinde çalıştığı atomlardan 100 milyon defa küçük oldukları anımsanırsa, bu etkileyici bir başarıdır. Hesaplamaları nasıl yapacaklarını bilen fizikçiler, yanıtların şaşırtıcı bir kesinlikte doğru çıkmayı sürdürdüğünü gördü. Örneğin, (elektronların fotonlarla etkileşimini kuramlaştıran) kuantum elektrodinamiği, deney sayesinde, Los Angeles ile New York arasındaki mesafe konusunda bir insan saçının kalığından daha az hatayla uyuşan kesinlikte sonuçlar vermektedir!

Bu terimlerle düşünüldüğünde, kuantumun öyküsü heybetli bir başarı hikâyesi, belki de fizik bilimi tarihinin en büyük başarı öyküsüdür. Yine de, esaslı bir paradoks olduğu gibi durmaktadır. Fizikçiler hesaplamaları yapabilmelerine karşın hâlâ kuramı kavramıyorlar. Çözümlenmemiş halde duran ciddi yorum problemleri gündemdeki yerlerini koruyor. Bu problemler, özellikle akılları karıştıran iki meseleden kaynaklanıyor: kuramın olasılıkçı karakterinin önemi ve ölçüm sürecinin doğası.

Olasılıklar

Kökenleri olup bitenin bütün ayrıntılarıyla bilinememesinde yatan olasılıklar klasik fizikten doğdu. Yazı tura

atmak bu paradigmanın özeti niteliğindedir. Newtoncu mekaniğin –şans tanrıçası Fortuna'nın doğrudan müdahalesi söz konusu değilken– bozuk paranın havaya atıldıktan sonra nasıl düşmesi gerektiğini belirlediğinden hiç kimsenin kuşkusu olmasa da, bu devinim, sonucun ne olacağını kesin biçimde öngörebilmemizi olanaklı kılan fırlatma biçiminin (farkında olmadığımız) kesin ve küçük ayrıntılarına fazlasıyla duyarlıdır. Buna karşılık, eğer bozuk para hileli değilse, yazı için 1/2 ve tura için 1/2 olmak üzere, her ikisinin de gelme olasılığının eşit olduğunu biliriz. Aynı şekilde, hileli olmayan zar atışında da belirli bir sayının gelme ihtimali 1/6'dır. 1 ya da 2 atma olasılığı sorulduğunda, ayrı olasılıklar basit bir biçimde birbirine eklenerek 1/3 sonucu bulunur. 1 ya da 2 atma edimleri ayrı ve birbirlerinden bağımsız olduğu için bu toplama kuralı geçerlidir. Birbirlerini etkilemedikleri için doğan olasılıklar birbirine eklenir. Bütün bunlar oldukça açık ve basit gözükmektedir. Ama kuantum dünyasında durum farklıdır.

İlk önce, elektronlar ve çift yarık kuantum deneyinin klasik karşılığı olabilecek bir deneyi inceleyelim. Tenis toplarının iki deliği olan bir ağa atılması, bu kuantum deneyi için gündelik hayattan alınmış bir benzetme olacaktır. Bir topun bir delikten geçmesinin belirli bir olasılığı ve diğer delikten geçmesinin de bir başka olasılığı vardır. Eğer topun ağın öbür tarafına geçme şansının ne olduğuna bakarsak, topun iki deliğin birinden geçmesi gerektiği için, (tıpkı zarın iki yüzü için yaptığımız gibi) yalnızca bu iki olasılığı birbirine ekleriz. Üstdüşüm özelliği elektronların her iki yarıktan birden geçmesine izin verdiği için kuantum ortamında durum farklıdır. Klasik olarak birbirlerinden

ayrı olan olasılıklar, kuantum mekaniğinde bir biçimde birbirlerine karışırlar.

Sonuç olarak, olasılıkların birleşim yasaları kuantum kuramında farklıdır. Gözlenmeyen ara olasılıkların toplamının hesaplanması gerekiyorsa, birbirine eklenmesi gereken olasılıkların kendileri değil, *olasılık genlikleri*dir. Çift yarık deneyinde, A'dan geçiş genliğini B'den geçiş genliğine eklememiz gerekir. Olasılıkların bir tür kare alma işlemiyle genliklerden hesaplandığını anımsayalım. Ekleme işleminin karesi alınmadan önceki sonuç, matematikçilerin "çapraz terimler" diye adlandırdıkları şeyi verir. Aşağıdaki basit matematiksel eşitlik incelenerek bu durum kolaylıkla anlaşılabilir:

$$(2 + 3)^2 = 2^2 + 3^2 + 12$$

Bu "fazladan" 12, çapraz terimdir.

Muhtemelen, bu biraz gizemli gözükmektedir. Temel düşünce şudur: Gündelik dünyada, nihai sonuca bağlı olasılığa yalın bir biçimde bağımsız ara olasılıkları birbirine ekleyerek ulaşırız. Kuantum dünyasında, doğrudan gözlenemeyen ara olasılıkların birleşimi çok daha incelikli ve sofistike bir biçimde gerçekleşir. Bu nedenledir ki, kuantum hesabı çapraz terimler içerir. Olasılık genlikleri aslında karmaşık sayılar oldukları için, bu çapraz terimler evre etkilerini içerirler. Dolayısıyla, çift yarık deneyinde olduğu gibi, ya yapıcı ya da yıkıcı girişim söz konusu olabilir.

Toparlamak gerekirse, klasik olasılıklar bilgisizliğe karşılık gelir ve basit toplama işlemiyle birleşirler. Kuantum olasılıkları, anlaşıldığı kadarıyla, gözlemlenmesi çok daha

zor ve betimlenemez bir yoldan birleşirler. Bu durumda şu soru gündeme gelmektedir: Sonuçta, kuantum olasılıklarının kökeninin, fizikçinin olup biteni bütün ayrıntılarıyla bilmemesinde yattığını düşünmek olanaklı mıdır? Dolayısıyla, durumun ne olduğunun erişilemez, ama tümüyle ayrıntılı bilgisine karşılık gelen temel olasılıklar klasik bir biçimde toplanacak mıdır?

Bu kuşkunun ardında fiziğe belirlenimci karakterini yeniden kazandırma isteği yatmaktadır. Nitekim, sonradan bunun üstü kapalı bir belirlenimcilik olduğu ortaya çıktı. Örneğin, (istikrarsız ve parçalanmaya eğilimli) radyoaktif bir çekirdeğin bozunumunu düşünelim. Kuantum kuramı, yalnızca bu bozunumun meydana gelme olasılığını kestirebilir. Örneğin, bir çekirdeğin önümüzdeki bir saat içinde bozunuma uğrama olasılığının 1/2 olduğunu söyleyebilir, ama bu bir saat boyunca bu özel çekirdeğin gerçekten bozunup bozunmayacağını kestiremez. Bununla birlikte, belki de bu çekirdeğin ne zaman bozunacağını belirleyen küçük bir içsel saat var ve biz onu okuyamıyoruz. Eğer içsel bir saatin olduğu doğru ise ve eğer aynı türden başka çekirdeklerin farklı zamanlarda bozunuma uğramalarına neden olan, ayarları farklı kendi içsel saatleri var ise, bizim olasılıklar diye belirlediklerimiz yalnızca bilgisizlikten, bu gizli içsel saatlerin ayarlarına erişemememizden kaynaklanmaktadır. Her ne kadar bozunumlar bize raslantısal görünse de, aslında, bunlar bilinmeyen ayrıntılar tarafından bütünüyle belirlenmektedir. Bundan dolayı, nihai gerçeklikte, kuantum olasılığı klasik olasılıktan farklı değildir. Bu tür kuramlar *gizli değişken*li kuantum mekaniği yorumları diye adlandırılmaktadır. Bunlar gerçekte bir olasılık mıdır?

Ünlü matematikçi John von Neumann, olağandışı kuantum olasılıklarına has niteliklerin, gizli değişkenlerin bilinmemesinin bir sonucu olarak yorumlanamayacağını içerimlediğini gösterdiğine inandı. Aslında, uslamlamasında ortaya çıkarılması yıllar alan bir hata vardı. İlerideki sayfalarda, olasılıkların ayrıntıların bilinmemesinden doğduğu belirlenimci bir kuantum kuramı yorumunun olanaklı olduğunu göreceğiz. Buna karşılık, belirlenimcilik konusunda başarı sağlayan bu kuramın fizikçilerin çoğuna cezbedici gelmeyen özellikler taşıdığını da göreceğiz.

Uyumsuzluk

Bu bölümde üzerinde durduğumuz problemlerin bir boyutu, fiziksel dünyadaki davranışları belirsiz ve düzensiz kuarklar, gluonlar ve elektronlar gibi kuantum bileşenlerinin, açık ve güvenilir görünen, makro ölçekli gündelik deneyim dünyasını nasıl olup da oluşturabildiği sorularak anlatılabilir. Bu geçişi anlayabilmede önemli bir adım, son 25 yıl içinde sağlanan bir gelişme aracılığıyla atıldı. Fizikçiler, kuantum süreçlerinin gerçekleştiği çevreyi birçok durumda eskisine göre daha fazla ciddiye almaları gerektiğini fark etmeye başladılar.

Geleneksel düşünce, birbirleriyle etkileşimleri açık bir inceleme konusu olan kuantum kendilikleri dışında çevrenin boş olduğu kanısındaydı. Fiili gerçekte ise bu idealleştirme her zaman iş görmez ve onun iş görmediği yerde bu olgudan önemli sonuçlar doğabilmektedir. İhmal edilen şey, ışınımın heryerdeliğiydi. Deneyler, bazıları gü-

neşten, bazıları da evrensel kozmik arkaplan ışınımından gelen, her yeri kaplayan fotonlar denizinde yapılmaktadır. Evrensel kozmik arkaplan ışınımı, evrenin yaklaşık yarım milyon yaşında olduğu, maddenin ve ışınımın daha önceki evrensel karışmalarından kopabilecek kadar soğudukları zamana tarihlenen uzun süreli bir yankıdır.

Arkaplan ışınımının heryerdeliğinin önemi, ilintili olasılık genlikleri evrelerini etkilemesinden kaynaklanmaktadır. "Evre raslaşması" diye adlandırılan bu durumun dikkate alınması, belirli durumlarda kuantum olasılık hesaplarındaki çapraz terimlerin neredeyse bütünüyle kaldırılması gibi bir etki yaratabilir. (Çok daha genel anlamda söylenirse, artı kadar eksinin de sıfıra yakın bir sonuç veren ortalaması alınır.) Bütün bunlar oldukça şaşırtıcı bir hızla meydana gelebilir. Bu görüngünün adı "uyumsuzluk"tur.

Kimileri, uyumsuzluğun, mikro ölçekli kuantum görüngüsü ile makro ölçekli klasik görüngünün birbirleriyle nasıl ilişkilendiğini anlamanın ipucunu sağladığını düşünüyor. Ne yazık ki, bu yalnızca kısmen doğrudur. Uyumsuzluk, bazı kuantum olasılıklarının klasik olasılıklar gibi görünmesini sağlamaya yardımcı olabilir ama onları klasik kılamaz. "Ölçüm problemi" diye adlandırılan, kafa karıştırıcı, önemli bir etken hâlâ olduğu gibi durmaktadır.

Ölçüm problemi

Ölçüm klasik fizikte bir problematik değildir. Ölçüm, basitçe, durumun gözlemlenmesidir. Yazı tura atarken tura gelme olasılığının 1/2 olacağını belirlemekten daha

fazlasını yapamasak da, gördüğümüz bu ise eğer, fiilen gerçekleşen bu olduğu için böyledir.

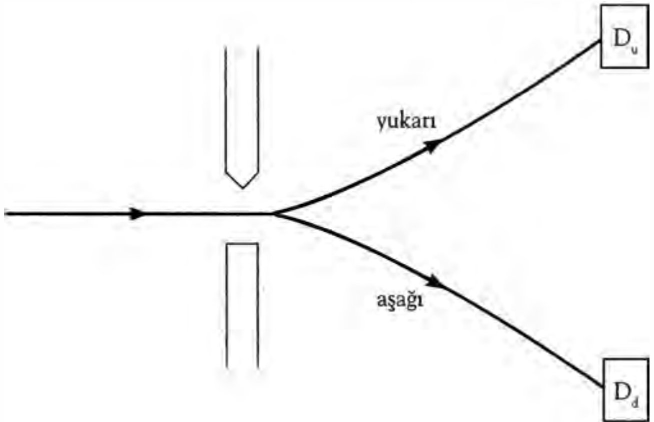
Geleneksel kuantum kuramında ölçüm farklıdır; çünkü üstdüşüm özelliği, alternatif ve en nihayetinde karşılıklı olarak birbirlerini dışlayan olasılıkları, bunlardan birinin tek başına bir gerçeklik olarak belirdiği son ana kadar bir arada tutar. Bunun üzerine düşünmenin bir yolunun dalga paketinin çöküşünden hareket ederek gösterilebileceğini görmüştük. Elektronun olasılığı "bura"ya, "ora"ya ve "her yer"e saçılmaktır; ama fizikçi ona deney yoluyla "neredesin" sorusunu yöneltir ve bu özel durumda "bura"da yanıtı gelirse, bütün olasılıklar bu biricik gerçeklik karşısında çöker. İrdelememizde şimdiye kadar yanıtsız kalan büyük soru şudur: Bu nasıl oluyor?

Ölçümler, ilişkili sonuçlar zinciridir. Mikro ölçekli kuantum dünyasındaki bir durum, bu zincir aracılığıyla, laboratuar ölçüm aygıtlarının gündelik dünyasında kendisine karşılık gelen gözlenebilir bir işaret oluşturur. Biraz idealleştirilmiş olsa da, yanıltıcı olmayan bir deneyi inceleyerek ana düşünceyi açıklayabiliriz. Bu deney, bir elektronun *spin*ini ölçmektedir. Spinin niteliği küçücük mıknatıslar gibi hareket eden elektronlarla uyumludur. Okuyucudan bir kanıt olmaksızın kabul etmesinin talep edileceği tanımlanamaz kuantum etkisinden dolayı, elektronun mıknatıs özelliği yalnızca geleneksel olarak "yukarı" ve "aşağı" diye adlandırabileceğimiz iki karşıt istikamete yönelebilir.

Deney, başlangıçta kutuplaşmamış olan bir elektron demetiyle, yani kararlı bir "yukarı" ve "aşağı" üstdüşümü olan elektronlarla yürütülür. Bu elektronlar homojen

olmayan bir mıknatıs alanından geçirilirler. Spinlerinin mıknatıs etkisinden ötürü, elektronlar spin yönüne göre yukarıya ya da aşağıya doğru sapacaklardır. Bunlar uygun bir biçimde yerleştirilmiş D_u ve D_d (Geiger sayacı olabilirler) algılayıcılarından birinden geçecektir ve ardından da deneyci bir elektronun yukarıya ya da aşağıya doğru geçişini kaydeden bu algılayıcılardan birinin çıtlamasını duyacaktır. Bu yöntem, bu tür bir araştırmayı ilk defa gerçekleştiren iki Alman fizikçiden beri Stern-Gerlach deneyi diye adlandırılmaktadır. (Aslında, bu deney atom demetiyle yapıldıysa da, olup biteni denetleyen şey atomlardaki elektronlardı.) Bu olup biteni nasıl çözümlemeliyiz?

Eğer spin yukarıya doğruysa, elektron aşağıya doğru sapar, ayrıca D_u'dan geçtiğinde D_u çıtlar ve deneyci D_u'nun



6. Stern-Gerlach deneyi.

çıtladığını duyar. Eğer spin aşağıya doğruysa, elektron yukarıya doğru sapar, ayrıca D_d'den geçtiğinde D_d çıtlar ve deneyci çıtlamayı duyar. Deneyici bu çözümlemede olan biteni görür. Çözümleme bize birbiriyle ilişkili bir sonuçlar zinciri sunmaktadır. Eğer ... olursa ... olur. Ama fiili bir ölçüm durumunda bu halkalardan yalnızca biri ortaya çıkar. Bu özel durumda bu özel olayın gerçekleşmesini ne mümkün kılmaktadır? Bu sefer yanıtın "aşağı" değil de "yukarı" olacağını ne belirlemektedir?

Uyumsuzluk bu soruya yanıt vermez. Uyumsuzluk, ayrı zincirleri daha klasik bir hale bürüyerek aralarındaki bağlantıları pekiştirse de, belirli bir durumda gerçek olan olasılığın niçin belirli bir zincir olduğunu açıklamamaktadır. Ölçüm probleminin özü, bu özgüllüğün kökenini anlamaya çalışmaktır. Önerilen çeşitli çözümleri incelediğimizde, bunların hiçbirinin bütünüyle doyurucu olmadığını ve karanlık noktalar içerdiklerini göreceğiz. Öneriler birtakım başlıklar altında sınıflandırılabilirler.

(1) İlintisizlik

Kimi yorumcular sorunu ilintisiz olduğunu öne sürerek geçiştirme gayretindedir. Bu tutumu savunan bir uslamlamaya göre, bilim yalnızca birbiriyle ilişkili görüngülerle ilgilenmektedir ve onun bu görüngüleri anlamayı amaçlaması gerekmektedir. Bu pozitivist bir savdır. Kuantum hesaplamalarını nasıl yapacağımızı biliyorsak ve yanıtlarımız görgül deneyle tatminkâr biçimde uyumluysa, başka bir şey istememeliyiz. Daha fazlasını istemek yersiz bir entelektüel

açgözlülüktür. "Tutarlı tarihler" yaklaşımı diye adlandırılan bir yaklaşım, daha arı bir pozitivizm sergilemektedir. Bu yaklaşım, klasik ölçüm aygıtlarının kullanımının sağladığı sonuçlar olarak kolaylıkla yorumlanabilecek kuantum kestirim dizileri elde etmek için reçeteler vermektedir.

İlintisizlik başlığı altındaki bir başka uslamlama, kuantum fiziğinin kesinlikle tek tek olaylar hakkında konuşması gerekmediğini, onun asıl olarak 'topluluklar"la, yani olayların toplamlarının istatistik özellikleriyle ilgilenmesi gerektiğini iddia eder. Eğer bu savlar doğru olsaydı, beklenmesi gereken bütünüyle olasılıkçı bir açıklama olurdu.

Bu genel kategorideki üçüncü bir uslamlama türü, dalga işlevinin kesinlikle fizik sistemlerinin durumlarına değil, insanlığın bu sistemlere dair bilgisinin durumuna ilişkin olduğunu iddia etmektedir. Eğer "çöküş", yalın bir biçimde bilgikuramsal bir çerçevede düşünülürse, problematik bir görüngü değildir: Daha önce bilgisizdim, şimdi biliyorum. Buna karşın, bütünüyle zihinde olup bittiği söylenen bir şeyin temsilinin, Schrödinger eşitliği gibi fiziğe has bir eşitliği fiilen karşılamak zorunda olması çok garip görünmektedir.

Bütün bu uslamlamaların ortak bir özelliği var. Fiziğin görevi konusunda minimalist bir bakış açısına sahipler. Özellikle, fiziğin özel fizik süreçlerinin ayrıntılı karakterini anlamakla ilgilenmediğini varsayarlar. Bu yaklaşım, belirli bir felsefe eğilimiyle uyumlu olabilirse de, tutkusu fiziksel dünyayı olabildiğince çok kavramak olan bilim insanın düşünce yapısına temelden aykırıdır. Daha azına razı olmak kâtiplerin ihaneti demek olacaktır.

(2) Büyük sistemler

Kuantum mekaniğini kuranlar, elbette, ölçümün kuram bağlamında sorun yarattığının farkındaydı. Ölçüm konusuyla özellikle Niels Bohr çok ilgilendi. Bohr'un önerdiği çözüm *Kopenhag Yaklaşımı* diye bilinmektedir. Yaklaşımın temel düşüncesine göre, en önemli rol klasik ölçüm aygıtlarına aitti. Bohr, belirleyici etkiyi büyük ölçüm araçlarının müdahalesinin yarattığını savundu.

Klasik mekaniğin gündelik ölçekte gerçekleşen süreçlerin tanımlanmasında gösterdiği kayda değer başarıları kuantum kuramında tekrarlayabilmenin bir yolunu bulmak, ölçüm sorunu ortaya çıkmadan önce de elzemdi. Mikro ölçekli olanı makro ölçekli bir anlayıştan yoksun kalma pahasına tanımlamanın bir faydası olmaz. *Karşılıklılık ilkesi* diye adlandırılan bu koşul, kabaca, (Planck sabitinin koyduğu büyüklük ölçeği nispetinde) "büyük" sistemlerin, Newton eşitliklerinin mükemmele yakın biçimde sezdiği bir yolla davranması gerektiğini düşünebilmek anlamına gelir. Daha sonra, insanlar, kuantum mekaniği ile klasik mekanik arasındaki ilişkinin, bu basit tanımlamanın resmettiğinden daha incelikli, daha iyi bir uzlaşı olduğunu fark ettiler. İlerleyen sayfalarda, içsel olarak kuantum özellikleri sergileyen, hatta kuantum hesaplamasındaki teknolojik işletim olasılığını da içine alan bazı makro ölçekli görüngülerin söz konusu olduğunu göreceğiz. Buna karşın, bu görüngüler oldukça istisnai durumlarda ortaya çıkmaktadır ve karşılıklılık ilkesinin genel yönelimi doğru yoldadır.

Bohr, bir ölçümün hem kuantum kendiliğini hem de klasik ölçüm aygıtlarını içerdiğinin altını çizdi ve bu ikisi

arasındaki karşılıklı yüklenimi (onun bir "görüngü" diye adlandırdığı) bir paket anlaşma olarak düşünmemiz gerektiğinde ısrar etti. Bir ucu diğerine bağlanan, birbiriyle ilişki bir sonuçlar zincirinde sonucun tikelliğinin tam olarak nerede ortaya çıktığı, zincirin iki ucu kopmayacak bir biçimde birbirine bağlı tutulduğu sürece, kaçınılabilecek bir sorundu.

Bu önermenin ilk bakışta insana çekici gelen bir yönü var. Bir fizik laboratuarına girerseniz, onun Bohr'un bahsettiği türden araçlarla dolu olduğunu görürsünüz. Yine de, bu önermede insanı kuşkulandıran bir şeyler mevcut. Önermenin açıklaması, sanki fizik dünyası sakinleri iki farklı varlık sınıfından –düzensiz kuantum kendiliklerinden ve belirleyici klasik ölçüm araçlarından– oluşuyormuş gibi ikili bir vurgu taşır. Buna karşın, fiili gerçekte, bir tane, monistik bir fiziksel dünya vardır. Klasik araçların parçaları kuantum bileşenlerinden (eninde sonunda kuarklardan, gluonlardan ve elektronlardan) oluşurlar. Özgün Kopenhag yorumu, belirleyici araçların belirlenemez bir kuantum zemininden nasıl çıkabildiği sorusunu ele almayı becerememiştir.

Yine de, Bohr ve arkadaşları, yeterince gayretkeş olmasa da, doğru yönü işaret ediyor olabilir. Bugün kuantum fiziğiyle uğraşanların çoğunun Yeni-Kopenhag yaklaşımı diye adlandırılabilecek bu yaklaşımı onaylayacakları kanısındayım. Yeni-Kopenhag görüşüne göre, makro ölçekli araçların belirleyici bir rol oynamasını bir şekilde olanaklı kılan, büyüklükleri ve karmaşıklıklarıdır. Bunun nasıl olduğu kesinlikle yeterince anlaşılamıyorsa da, en azından büyük sistemlerin bir başka (ve aynı zamanda tam olarak

anlaşılmayan) özelliğiyle ilişkilendirilebilir. Bu özellik, *tersinmezlik*leridir.

Temel fizik yasaları, şu anki tartışmamız için gerçekten önem taşımayan biri dışında, tersinmezdirler. Bunun ne anlama geldiğini anlamak için, Heisenberg'in aksine, iki elektronun etkileşiminin filme çekilebileceğini varsayalım. Film ileri çekim gösterildiğinde de geri çekim gösterildiğinde de aynı duyguyu yaratacaktır. Bir başka deyişle, mikro dünyada geleceği geçmişten ayıran özgül bir zaman oku yoktur. Makro dünyada durum açıkça çok farklıdır. Sistemler çökmektedir ve gündelik dünya tersinmezdir. Giderek daha yükseğe zıplayan bir top geri çekim gösterilmektedir. Bu etkiler, yalıtılmış bir sistemde (düzensizliğin ölçüsü) entropinin kesinlikle azalmayacağını belirten termodinamiğin ikinci yasasıyla bağlantılıdır. Düzensizliğin hâkim olmasının nedeni, düzensiz olmanın düzenli olmaktan çok daha fazla imkâna sahip olmasıdır. Bunun içindir ki, karmaşa üstünlük kurar. Arada sırada derleyip toparlamadığınız takdirde masanızın ne hale geleceğini düşünün.

Bu durumda, ölçüm, mikro dünyadaki bir olgunun makro ölçekli bir işaretinin tersinmez bir biçimde kaydedilmesidir. Dolayısıyla, ölçüm, özgül bir zaman doğrultusunu içerir: Daha önce bir sonuç yokken, daha sonra vardır. Nitekim, büyük ve karmaşık sistemlerin tersinmezliklerini bütünüyle açıklayabilen bir büyük ve karmaşık sistemler anlayışının, bu sistemlerin kuantum ölçümünde oynadıkları rolün niteliğine ilişkin değerli bir ipucu verebileceğini düşünmek biraz olsun akla uygundur. Gelgelelim, bilgimizin mevcut düzeyinden ötürü, bu varsayım, gerçek bir başarıdan daha çok, gerçekleşmesi neredeyse olanaksız bir dilek gibidir.

(3) Yeni fizik

Kimileri, ölçüm sorunun çözümünün yalnızca bilime zaten tanıdık gelen daha ileri ilkeler ortaya koymayı değil, daha köktenci bir düşünmeyi gerektirdiği değerlendirmesinde bulundu. Ghirardi, Rimmer ve Weber, bu yenilikçi çizgi doğrultusunda (GRW kuramı diye bilinen) epey ilgi çeken bir sav öne sürdüler. Rasgele bir dalga işlevinin uzayda aniden çökmesinin evrensel bir özellik olmakla birlikte, bunun meydana gelme hızının mevcut maddenin miktarına bağlı olduğunu savladılar. Bu hız, kuantum kendilikleri için gözlenebilir hiçbir etkisi olamayacak kadar küçük olsa da, maddenin makro ölçekli niceliklerine göre (örneğin, klasik ölçüm araçlarının bir kısmında) hemen hemen anlık denebilecek bir hıza ulaşır.

Bu varsayım, ilke olarak ani çökme eğiliminin başka tezahürlerini belirlemeyi amaçlayan duyarlı deneyler aracılığıyla araştırılabilir. Buna karşılık, bu türden görgül bir doğrulama bulunmadığından, fizikçilerin çoğu GRW kuramının ikna edici olmak için fazla *ad hoc* olduğu düşüncesindedirler.

(4) Bilinç

Stern-Gerlach deneyinin çözümlemesinde, neden sonuç bağlantısını oluşturan zincirin son halkası, sayacın tıklamasını duyan insan gözlemciydi. Sonucu hakkında gerçekten bilgi sahibi olduğumuz her kuantum ölçümünün son adımında, bilinçli bir biçimde sonucu fark eden

biri vardır. Bilinç yeterince anlaşılamasa da, madde ile zihin arasındaki (belirli felsefeciler dışında) hiç kimsenin inkâr edemediği bir arayüz deneyimidir. İlaçların ve beyin hasarının etkileri, maddenin zihni etkilediğini açıkça göstermektedir. Peki, zihnin aksi yöndeki gücünün maddeyi etkilemesi neden olası olmasın? Bir kolumuzu isteyerek kaldırdığımızda buna benzer bir şey gerçekleşir. Hem belki de bir ölçümün sonucunu belirleyen, bilinçli gözlemcinin müdahalesidir. Bu önerme ilk bakışta oldukça çekicidir; zaten birçok ünlü fizikçi de bu bakış açısını desteklemektedir. Ne var ki, bu bakış açısı birtakım çok ciddi sorunlar da barındırmaktadır.

Evren çoğu zaman ve çoğu yerde bilinçten mahrumdur. Öyleyse, bu büyük kozmik uzam ve zaman alanlarında belirli bir sonuca varan herhangi bir kuantum sürecinin gerçekleşmediğini mi varsayacağız? Sonucun otomatik olarak saklanan kâğıtlara basıldığı ve hiçbir gözlemcinin bunlara altı aydan önce bakamadığı bilgisayar destekli bir deney düzenlendiğini varsayalım. Kâğıt üzerinde belirli bir izin ancak altı ay sonra belireceği mi düşünülmelidir?

Bu sonuçlar kesin bir biçimde olanaksız olmasa da, birçok bilim insanı bunların kesinlikle olanaksız olduğunu düşünmektedir. Schrödinger'in kedisinin acıklı hikâyesi düşünülürse, sorunlar geleceği karartmaktadır. Talihsiz hayvan, izleyen bir saat içinde bozunuma uğrama olasılığı 50'ye 50 olan radyoaktif bir kaynağın bulunduğu bir kutuda hapistir. Eğer bozunum gerçekleşirse, yayılan radyasyon kediyi anında öldürecek zehirli gazın serbest kalmasını sağlayacaktır. Kuantum kuramının geleneksel ilkelerinin kutuya uygulanması ve bunun içeriği, bilinçli bir gözlemci

kutunun kapağını açmadan önceki bir saatlik sürenin sonunda kedinin tarafsız bir "canlı" ve "ölü" üstdüşümde bulunduğu sonucuna götürür. Kesinlikle soğuyan bir cesedin ya da kesinlikle oyun oynayan bir kedinin bulunmasıyla gerçek olacak olasılıkların ani çöküşü, ancak kutu açıldıktan sonra söz konusu olabilecektir. Ama, bir insanın bu sonuca ulaşmasına yardım etmek için müdahil olmasına gereksinim duymaksızın, hayvan canlı olup olmadığını bilmekte midir? Dolayısıyla, belki de, kuantum sonuçlarının belirlenmesinde kedinin bilincinin insanın bilinci kadar etkin olduğu sonucuna varmalıyız. Öyleyse nerede duracağız? Solucanlar da dalga işlevini çökertebilir mi? Solucanlar tamamen bilinçli olmayabilir, ama birisi onların bir biçimde canlı ya da ölü olmak gibi kesin bir vasfa sahip olduğunu varsaymaya yönelecektir. Bu tür sorunlar, çoğu fizikçinin bilince benzersiz bir rol biçmenin ölçüm sorununu çözmenin bir yolu olduğuna inanmasını engelledi.

(5) Birçok-dünya

Çok daha cesur bir öneri, çöküş düşüncesini bütünüyle reddetmektedir. Bu önerinin yandaşları, dalga işlevinin süreksiz biçimde değiştiğini savunan bütünüyle *ad hoc* bir varsayımı kuantum biçimciliğine dışarıdan dayatmak yerine, onu çok daha ciddiye almak gerektiğini öne sürmektedir. Onlara göre, çöküş düşüncesi bir kenara bırakılarak olabilecek her şeyin *olduğu* kabul edilmelidir.

Bu durumda, elektronun "buradan" başka hiçbir yerde olmadığını bulan deneyciler niçin aksi bir izlenime sahip-

ler? Buna verilen yanıt, bu evrendeki gözlemcinin bakış açısının oldukça sınırlı olduğu ve kuantum gerçekliğinin böylesine sınırlı bir tanımın öne sürdüğünden çok daha büyük olduğu yolludur. Yalnızca Schrödinger'in kedisinin yaşadığı bir dünya söz konusu değildir, aynı zamanda, bu dünyaya koşut ama ondan bağımsız, Schrödinger'in kedisinin öldüğü bir dünya da vardır. Bir başka deyişle, her ölçüm etkinliğinde, fiziksel gerçeklik, her birinde farklı (klonlanmış) deneycilerin ölçümün farklı olası sonuçlarını gözlemlediği ayrı evrenler çokluğuna bölünür. Gerçeklik basit bir evren değil, bir çoklu-evrendir.

Kuantum ölçümleri sürekli yapıldığı için, bu uslamlama şaşırtıcı bir ontolojik savurganlık sergilemektedir. Mantık "ustura"sıyla fazla varsayımları kesip atacağı düşünülen zavallı Ockhamlı William, kendiliklerin böylesine çoğaltılması düşüncesi karşısında mezarında ters dönmüş olmalı. Hayal edilemez yoğunluktaki bu çoğaltımı kavramanın farklı bir yolu da, onu kozmosun dışında değil, gözlemcilerin zihinlerinde/beyinlerinde gerçekleşiyor gibi düşünmektir. Böyle bir konumlandırma, birçok-dünya yorumundan birçok-zihin yorumuna bir geçiş olsa da, önerme savurganlığını azaltmak konusunda pek işe yaramamaktadır.

Başlangıçta bu düşünce tarzından yalnızca kuantum kuramını evrenin kendisine uygulamaya çalışan kuantum kozmologları etkilendi. Mikro ölçekli olanın makro ölçekliyle nasıl ilişkilendiği konusundaki kafa karışıklığımız sürerken, kozmik yöndeki bu genişleme, olabilirliği açık görünmeyen cüretkâr bir girişimdir. Buna karşılık, bu mümkün olsa bile, birçok-dünya yaklaşımı yalnızca bir seçenektir, çünkü kozmos işin içine girdiğinde bilimin

dışarıdaki büyük sistemlerin ya da bilincin etkilerine başvurması için yeterli alan kalmamaktadır. Son zamanlarda birçok-dünya yaklaşımını benimseme eğiliminin diğer fizikçiler arasında da giderek arttığı görülmekte; ama, birçoğumuz için o hâlâ sert bir kabuğu olduğunu bildiğimiz kuantum fındığının kırılmasına yarayacak metafizik bir buharlı şahmerdandır.

(6) *Belirlenimcilik*

David Bohm, 1954 yılında, kuantum kuramının tamamen belirlenimci bir açıklamasını yayınladı; ama bu açıklama geleneksel kuantum mekaniğininkiyle hemen hemen aynı deney kestirimlerinde bulunmaktaydı. Bu kurama göre, olasılıklar yalnızca belirli ayrıntıların bilinmemesinden kaynaklanmaktaydı. Bu dikkat çekici buluş, John Bell'i, von Neumann'ın bunun olanaksız olduğunu belirten uslamlamasını yeniden gözden geçirmeye ve onun uslamlamasının dayandığı kusurlu varsayımı gözler önüne sermeye yöneltti.

Bohm, bu etkileyici beceriyi, Kopenhag düşüncesinin sağlam bir tamamlayıcılıkta birleştirdiği dalga ile parçacığı birbirinden ayırarak sergiledi. Bohm'un kuramında Isaac Newton'un arzu edebileceği denli sorunsuz biçimde klasik parçacıklar vardır. Parçacıkların konumları ve devinirlikleri ölçüldüğünde, bu yalnızca aşikâr bir durumun gözlemlenmesi meselesidir. Parçacıklara ilaveten, biçimi her an bütün çevre hakkındaki bilgiyi özetleyen tamamen ayrı bir dalga vardır. Bu dalga doğrudan fark edilebilir değildir,

ama parçacıkları etkileyebilen yerleşik güçlerin etkilerinden maada parçacıkların hareketini etkilediği için görgül sonuçları vardır. Parçacıkları hassas bir biçimde etkileyen, girişim etkilerinin tezahürünü ve bunlarla bağlantılı belirgin olasılıkları üreten (kimi zaman "kılavuz dalga" ya da "kuantum gizilgücü"nün kaynağı diye atıfta bulunulan), gizli dalganın bu etkisidir. Kılavuz dalga etkileri kesinlikle belirlenimcidir. Her ne kadar sonuçlar oldukça kestirilebilir olsa da, bunlar hassas bir biçimde parçacıkların fiili konumlarının en ince ayrıntısına bağlıdır ve anlık değişimler karşısındaki bu duyarlılık raslantısallık tezahürü yaratır. Nitekim, Bohmcu kuramda parçacık konumları gizli değişkenler gibi hareket eder.

Bohm'un kuramını ayrıntısıyla anlamak için, kuramın çift yarık deneyini nasıl ele aldığını irdelemek aydınlatıcı olacaktır. Bohm'un kuramına göre, parçacıklar tanımlanabilir nitelikte oldukları için, elektron kesinlikle yarıkların yalnızca birinden geçmelidir. Bu durumda, bunun böyle olamayacağını savunan daha önceki uslamlamamızda yanlış olan neydi? Daha önceki uslamlamanın yerinden edilmesini olanaklı kılan gizli dalga etkisidir. Gizli dalganın bağımsız varlığı ve etkisi olmasaydı, elektron A yarığından geçtiyse yarık B'nin ilintisiz olduğu ve açık ya da kapalı olabileceği doğru olacaktı. Ama, Bohm'un dalgası bütün çevre hakkında anlık bilgi verdiği için, onun biçimi, B'nin kapalı ya da açık olmasına göre değişir. Bu farklılık, dalganın parçacıklara nasıl kılavuzluk ettiğine ilişkin önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Eğer B kapalıysa, parçacıkların çoğu A'ya karşılık gelen noktaya yönelirler; eğer B açık ise, parçacıkların çoğu algılayıcı perdenin ortasına yönelirler.

Belirli ve tanımlanabilir bir kuantum kuramı çeşitlemesinin fizikçilere çok çekici gelmesi beklenebilirdi. Ama, gerçekte, fizikçilerin çok azı Bohmcu düşünceleri benimsedi. Kuram kesinlikle aydınlatıcı ve akıllıcaydı; ama birçok fizikçi haddinden fazla kendinden emin olduğunu düşünmekteydi. Fazlaca kerameti kendinden menkul görünmesi kuramın cazibesini azalttı. Sözgelimi, gizli dalga bir dalga eşitliği sağlamalıdır. Peki, bu eşitlik nereden çıkmaktadır? Samimi yanıt gaipten, daha kesin bir ifadeyle Schrödinger'in zihninden geldi. Doğru sonuçlara ulaşmak için, Bohm'un dalga eşitliği Schrödinger eşitliği olmalıdır; ama bu, kuramın içsel mantığından hiçbir biçimde çıkarsanmamaktadır. Bu, düpedüz görgül sayılabilecek yanıtlar sunmak için tasarlanmış *ad hoc* bir stratejidir.

Ayrıca, kuramın bir bütün olarak olduğundan daha az yeterli görünmesine yol açan kimi teknik sorunlar vardı. Bu sorunların en zorlularından biri olasılıkçı özelliklerle ilişkilidir. Basitleştirme adına bunları şimdiye kadar gerektiği gibi açıklamadığımı kabul etmek zorundayım. Eğer Bohm'un kuramının parçacık eğilimlerine ilişkin belirlediği *başlangıç* olasılıkları geleneksel kuantum kuramının belirlediği olasılıklarla uyuşuyorsa, iki kuram arasındaki uyuşmanın daha sonraki bütün hareketler için de geçerli olacağı kesinlikle doğrudur. Ne olursa olsun, doğru bir başlangıç yapmalısınız. Başka bir deyişle, Bohm kuramının görgül olarak başarılı olabilmesi için ya evren başlangıçta tesadüfen doğru (kuantum) olasılıklarla yola koyulmalı ya da eğer bu şekilde yola koyulmadıysa, yakınlaşma süreci hızla onu bu yöne sürüklemelidir. İkinci olasılık akla uygun görünüyor (bir fizikçi bunu kuantum olasılıkları

üzerindeki "gevşeme" diye adlandıracaktır); ama bu ne kanıtlanmıştır ne de zaman ölçütü güvenilir bir biçimde hesaplanmıştır.

Ölçüm sorununu çözmek üzere sunulan, en iyi ihtimalle kısmen ikna edici önerilerin şaşırtıcı çeşitliliği üzerine düşündükçe sorun bizi kaygılandırmayı sürdürmektedir. Başvurulacak seçenekler şunları içeriyor: yoksama (ilintisizlik); bilinen fizik (uyumsuzluk), umutla beklenen fizik (büyük sistemler); bilinmeyen yeni fizik (GRW); gizli yeni fizik (Bohm); metafizik konjektür (bilinç; birçok-dünya). Bu, ölçümün fizik düşünüş içindeki merkezi rolü göz önünde tutulursa, bir fizikçi için anlatılması sıkıntılı, dolambaçlı bir hikâyedir. Samimi olmak gerekirse, düşünsel olarak kuantum kuramını istediğimiz denli sıkı kavrayamamaktayız. Kuantum hesaplarını yapmakta ve bu anlamda görüngüyü açıklamaktayız; ama olup biteni gerçekten *anlayamıyoruz*. Bohr'a göre, kuantum mekaniği belirsizdi; Bohm'a göre, kuantum mekaniği belirliydi. Bohr için Heisenberg'in belirsizlik ilkesi ontolojik bir belirsizlik ilkesidir; Bohm için Heisenberg'in belirsizlik ilkesi bilgikuramsal bir bilgisizlik ilkesidir. Bu metafizik ve yorumsal sorunların bazılarına son bölümde geri döneceğiz. Bu arada, daha ileri düzeyde bir spekülatif sorun bizi beklemekte.

Öncelikli durumlar var mı?

19. yüzyılda, Sir William Rowan Hamilton gibi matematikçiler, Newtoncu dinamik sistemlerin doğasına ilişkin çok genel anlayışlar geliştirdiler. Bu araştırmaların bir

özelliği, irdelemeyi açık ve kesin bir biçimde ifade etmek üzere birçok eşdeğerli yolun bulunduğunu göstermeleriydi. Süreçleri uzamda gerçekleştikleri sırada açık bir biçimde tanımlaya öncelikli bir rol vermek, fiziksel düşüncenin amaçlarına oldukça uygundur; ama bu kesinlikle temel bir zorunluluk değildir. Dirac kuantum kuramının genel ilkelerini geliştirdiğinde, farklı bakış açıları arasındaki bu demokratik eşitlik ortaya çıkan yeni dinamiklerde korundu. Temel kurama göre, bütün gözlenebilir öğelerle bunların karşılık geldiği özdurumlar eşit statüdeydi. Fizikçiler bu inancı "öncelikli temel" (eşsiz öneme sahip bir dizi özel gözlenebilir öğeye karşılık gelen özel bir dizi durum) yoktur diyerek ifade etmektedir.

Ölçüm problemiyle boğuşan kimi fizikçilerin aklına, bu öncelik tanımama ilkesinin korunmasının gerekli olup olmadığı geldi. Bu bağlamda sunulan çeşitli önerilerin ortak özelliği, çoğunun belirli durumlara ya çöküşün nihai durumu ya da bakış-açısal çöküş yanılgısına neden olan durum olarak özel bir rol atfetmeleridir: Ölçüm araçları etrafında dönen (Yeni-)Kopenhag tartışmasında, uzamsal konum, fotoğraf tabakalarının üzerindeki ölçeklerden ya da izlerin göstergelerinden söz edermişçesine özel bir rol oynuyor gibidir; benzer bir biçimde, birçok-dünya yorumunda, koşut dünyalar arasındaki bölünmenin temeli aynı durumlardır; bilinç yorumunda, bu, muhtemelen madde/zihin arayüzünün öncelikli temeli olan algılamalara karşılık gelen zihin durumlarıdır; GRW önermesi, uzamsal konum durumlarının çöküşünü koyutlar; Bohm kuramı, parçacık konumlarına, kuramın etkin gizli değişkenlerinin anlık ayrıntılarına özel bir önem atfeder. Ayrıca, uyumsuzluğun uzayda

meydana gelen bir olgu olduğuna dikkat etmeliyiz. Bunlar, aslında, sözü geçen demokratik düşüncenin gözden geçirilmesi gerektiğini belirten işaretler olmalarına rağmen, kuantum mekaniğinin fizik üzerinde tedrici bir düzeltici etkide bulunacağı ileride ortaya çıkacaktı.

IV. Bölüm

İZLEYEN GELİŞMELER

Temel kuantumun bulunduğu 1920'lerin ortasındaki heyecan verici dönemi yeni kuramın içerimlerinin araştırıldığı ve kullanıldığı uzun bir gelişme dönemi izledi. Şimdi, izleyen gelişmelerin ortaya koyduğu içgörülerin bazılarının üzerinde durmamız gerekiyor.

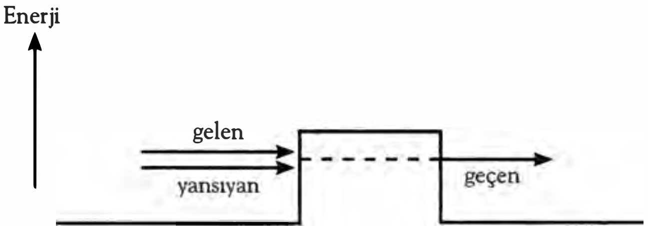
Sızma

Heisenberg'e özgü belirsizlik ilişkileri yalnızca konumlar ve momentumlar için geçerli değildir. Zaman ve enerji için de geçerlidir. Her ne kadar –klasik kuramda olduğu gibi– kuantum kuramında da enerji genelde korunumlu bir nicelik olsa da, bu yalnızca belli bir belirsizlik noktasına kadar böyledir. Bir başka deyişle, kuantum mekaniğinde, uygun çabuklukla geri vermek koşuluyla fazladan enerji "ödünç" alma olasılığı vardır. Biraz pitoresk özellikli (ayrıntılı hesaplarla daha kesin ve daha ikna edici kılınabilir)

bu sav, klasik fizikte enerji konusunda yasak olan bazı şeyleri kuantum mekaniği bakımından olanaklı kılmaktadır. Bu tür bir sürecin bilinen ilk örneği, potansiyel bir engelden sızma olasılığıdır.

Prototip durum, resim 7'de genel biçimiyle gösterilmektedir. 7. resimdeki kare biçimli "tepe", girerken tepenin yüksekliğine eşit bir enerji (potansiyel enerji olarak adlandırılır) vergisi ödemenin gerekli olduğu bir bölgeyi temsil etmektedir. Hareket eden bir parçacık, hareketinin (fizikçilerin kinetik enerji dediği) enerjisini beraberinde taşır. Klasik fizikte bu durum kesindir. Kinetik enerjisi potansiyel enerji vergisinden daha büyük olan bir parçacık engeli aşarken (bir tepeyi aşmaya çalışan bir arabanın yavaşlaması gibi) hızı doğal olarak düşecektir; ama engeli aşıp öbür tarafa geçtiğinde bütün kinetik enerjisini yeniden yüklenerek yine hızlanacaktır. Parçacığın kinetik enerjisi potansiyel engelden daha az ise, parçacık "tepe"yi aşamayacak ve geriye sıçrayacaktır.

Zaman karşılığında enerji ödünç almaya has ayırıcı bir olasılık nedeniyle kuantum mekaniğinde durum fark-



7. Sızma.

lıdır. Kuantum mekaniğinde, bu olasılık, klasik fizik açısından kinetik enerjisi tepeyi aşmak için yeterli olmayan bir parçacığın kimi zaman engeli aşmasını olanaklı kılabilir. Bunu, onun zorunlu zaman sınırı içinde enerjiyi geri vermesine yetecek hızla öteki tarafa varmasını sağlayarak yapar. Eğer parçacık tepede sızma yapabilmişse, onu aşabilir. Böylesi pitoresk bir hikâye yerine kesin hesaplamaların konulması, kinetik enerjisi engelin yüksekliğinden çok da az olmayan bir parçacığın engeli aşmasının ve geri sıçramasının belirli bir olasılığı olduğu sonucuna götürür.

Fizikte a-parçacıkları diye adlandırılan bileşenleri içeriyormuş gibi hareket eden radyoaktif çekirdekler vardır. Bu a-parçacıkları, nükleer güçlerin oluşturduğu potansiyel bir engel tarafından çekirdeğin içinde tutulur. Bu parçacıklar bu engelin içinden geçebiliyorlarsa, bütünüyle öbür tarafa sızmalarına yetecek enerjiye sahiptirler. Aslında, bu tür çekirdekler *a*-bozunma olgusu gösterir ve *a*-salınımlarının özelliklerinin niceliksel bir açıklamasını vermek için sızma hesaplamalarının kullanılması kuantum kaynaklı düşüncelerin nükleer alanda uygulanışının ilk zaferidir.

İstatistik

Klasik fizikte özdeş parçacıklar (iki elektron gibi aynı türden çiftler) birbirlerinden ayırt edilebilir. Başlangıçta bu iki parçacığı 1 ve 2 diye etiketlersek, ayrı parçacık yörüngelerinin izini sürerken bu ayırım işaretleri bize çok yardımcı olur. Elektronlar bir dizi karmaşık etkileşimin sonucunda ortaya çıksalar da, hâlâ ilke olarak hangisinin 1,

hangisinin 2 olduğunu söyleyebiliriz. Aksine, bulanık ve tanımsız kuantum dünyası için bu geçerli değildir. Kuantum dünyasında yörüngeler sürekli gözlenemediğinden, etkileşimden sonra söyleyebileceğimiz yalnızca *bir* elektronun şurada ve *bir* elektronun orada ortaya çıktığıdır. Başlangıçta seçilen etiketleme sonuna kadar izlenemez. Kuantum kuramında özdeş parçacıklar aynı zamanda ayırt edilemez parçacıklardır.

Etiketler özgül bir öneme sahip olmadıklarından, parçacıkların dalga işlevinde (ψ) göründükleri sıra ilintisiz olmalıdır. Özdeş parçacıklar için (3, 2) durumu fiziksel olarak (2, 1) durumuyla aynı olmalıdır. Bu, dalga işlevinin yer değiştirmek suretiyle değişmediği anlamına gelmemektedir, çünkü ψ'den ya da –ψ'den aynı fiziksel sonuçların elde edileceği ortadadır [11]. Bu yalın uslamlama önemli bir sonuca varmaktadır. Bu sonuç, "istatistik" diye adlandırılan, özdeş parçacık topluluklarının davranışıyla ilişkilidir. Kuantum mekaniğine göre, (ψ'nin değişime tabi davranışının iki olası işaretine karşılık gelen) iki olasılık söz konusudur:

Bose istatistiği, değişim durumunda ψ'nin aynı kalması halinde geçerlidir. Yani, iki parçacığın yer değiştirmesi durumunda dalga işlevi simetriktir. Bu özelliğe sahip olan parçacıklar bozonlar diye adlandırılır.

Fermi istastistiği, değişim durumunda ψ'nin işaret değiştirmesi halinde geçerlidir. Yani, iki parçacığın yer değiştirmesi durumunda dalga işlevi asimetriktir. Bu özelliğe sahip olan parçacıklar fermiyonlar diye adlandırılır.

Her iki seçenek de klasik fizik için ayırt edilebilir olan parçacıkların istatistiğinden farklı sonuçlar verir. Kuan-

tum istatistiği, hem maddenin özelliklerinin anlaşılması için hem de yeni teknik gereçlerin yapımı için önemli düşünceler sunmaktadır. (Birleşik Devletler'in gayrisafi yurtiçi hasılasının % 30'unun kuantum temelli –yarı iletkenler, lazerler ve benzeri– sanayilerden geldiği söylenmektedir.)

Elektronlar fermiyondur. Bu, iki elektronun hiçbir zaman tam anlamıyla aynı durumda bulunamayacaklarını içerimler. Bu olgudan, değişimin hem (iki durum aynı olduğu için) hiçbir değişime neden olmayacağını hem de (Fermi istatistiğinden ötürü) bir işaret değişikliğine neden olabileceğini savunan sonuçlar çıkmaktadır. Bu ikilemden kurtulmanın tek yolu, çift parçacık dalga işlevinin gerçekten sıfır olduğu sonucuna varmaktır. (Aynı uslamlamayı ifade etmenin bir başka yolu, iki özdeş kendiliğin anti-simetrik bir birleşimini oluşturamayacağınızı göstermektir.) *Dışlama ilkesi* diye adlandırılan bu sonuç, periyodik tabloyu ve orada yer alan elementlerin yinelenen özelliklerini anlamak için bir temel sağlar. Aslında, dışlama ilkesi, yaşamın gelişimini sürdürecek kadar karmaşık bir kimya olasılığının temelinde yatmaktadır.

Kimya için hikâye şöyle ilerler: Bir atomda elektronlar için kullanışlı yalnızca belirli enerji durumları vardır ve, kuşkusuz, dışlama ilkesi bu durumların birden fazla elektron tarafından işgal edilmemesini gerektirmektedir. Atomun kararlı en düşük enerji durumu, kullanışlı en düşük enerji yüklü durumların doldurulmasına karşılık gelir. Bu durumlar, fizikçilerin "çakışık" diye adlandırdıkları durumlar olabilir. Çakışık, tesadüfen enerjileri aynı birçok farklı durumun bulunduğu anlamına gelmektedir. Bir dizi çakışık durum, bir enerji düzeyi oluşturur. Atomun en dü-

şük enerji durumunun, elektronların atom için gereken elektron sayısına ulaşıncaya kadar ardışık enerji düzeylerinde birbirlerine eklenmelerinden oluştuğunu zihnimizde canlandırabiliriz. Atomun bir enerji düzeyinin bütün durumları dolduğunda, en ilerideki elektron atomun bir sonraki en yüksek enerji düzeyine geçecektir. Eğer bu düzey de zamanla dolarsa, bir sonraki düzeye geçecek ve bu böyle sürüp gidecektir. Birçok elektronu olan bir atomda, (aynı zamanda "kabuklar" diye adlandırılan) bir sonraki kabuğu kısmen tutan tek bir elektron dışarıda kalmaksızın, en düşük enerji düzeyleri tamamen dolacaktır. Çekirdekten en uzaktaki elektronlar, bir atomun diğer atomlarla arasındaki kimyasal etkileşimleri belirlerler. Atom, (periyodik tablonun bir ucundan diğer ucuna geçerek) atomik karmaşıklık derecesini yükselttikçe, ertelemede bulunan atomların (0, 1, 2, ...) sayısı kabukların dolmasına bağlı olarak dönemsel biçimde değişir ve periyodik tablonun kimyasal yinelemelerini üreten bu en dıştaki elektronların yinelenen modelleridir.

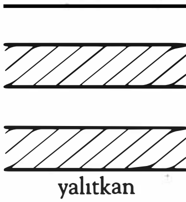
Elektronların aksine, fotonlar bozondur. Bozonların hareketinin femiyonların hareketinin tam zıddı olduğu kesindir. Bozonlar için dışlama ilkesi söz konusu değildir! Bozonlar aynı durumda olmayı severler. Fermiyonlar trenin vagonlarına tek tek dağılan Kuzey Avrupalılar gibiyken, Bozonlar trenin tek bir vagonunu neşeyle dolduran Güney Avrupalılara benzerler. Bozonların bu samimiyeti, en aşırı haliyle, bir tek durumda belirli bir yoğunlaşmaya yol açan bir olgudur. Bu olgu, Bose yoğuşması diye adlandırılmaktadır. Teknolojik lazer aletinin ardında yatan bu özelliktir. Lazer ışığı "yapışık" olmasından dolayı güçlüdür;

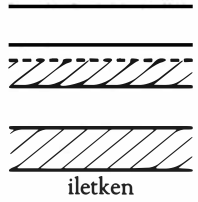
bir başka deyişle, lazer ışığı kesinlikle aynı durumdaki birçok fotondan oluşur. Bu, Bose istatistiklerinin hayli desteklediği bir özelliktir. Aşırı-iletkenlikle birleştirilen etkiler de (çok düşük ısılarda elektrik direncinin sıfırlanması) söz konusudur. Bu etkiler, kuantum özelliklerinin çıplak gözle gözlenebilen sonuçlarını doğuran Bose yoğuşmasına dayanır.

Elektronlar ve fotonlar, spini de olan parçacıklardır. Bir başka deyişle, dönen küçük tepecikler gibi özgül bir açısal devinirlikleri (bir dönel etkiler ölçüsü) vardır. Kuantum kuramına göre, doğal (Planck sabiti tarafından tanımlanan) birimlerde elektronlar 1/2 spine, fotonlar 1 spine sahiptirler. Bu olgu genel bir kuralı açıklamaktadır: Spini tam sayı olan parçacıklar daima bozon, spini buçuklu olan parçacıklar daima fermiyondur. Klasik kuantum kuramının bakış açısından, *spin ve istatistik savı* yalnızca açıklanamamış bir başparmak kuralıdır. Buna karşılık, (dışlama ilkesini de formülleştiren) Wolfgang Pauli, kuantum kuramı ile özel görelilik birleştirildiğinde bu birleşimden zorunlu olarak spin ve istatistik savının çıktığını buldu. Bu iki kuramın bir araya getirilmesi, her ikisinin kendi başlarına sağladığından daha zengin bir içgörü ortaya koymaktadır. Bütün, parçalarının toplamından daha fazla olduğunu göstermektedir.

Bant yapısı

Düşünülmesi en kolay katı madde biçimi, bileşen atomları düzenli bir diziliş modelinde sıralanan bir kris-





8. Bant yapısı.

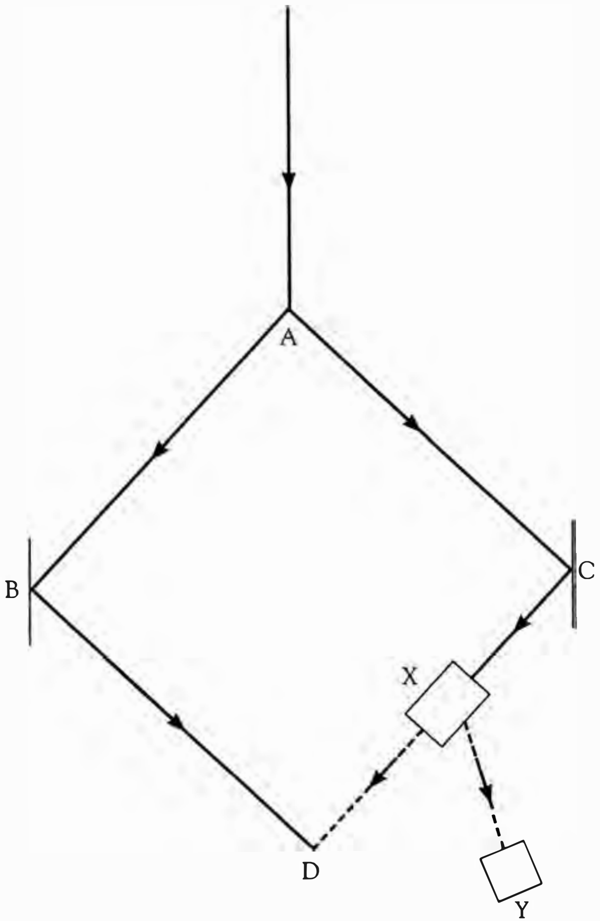
taldir. Gündelik deneyim ölçeğinde tanımlayıcı makro ölçekli bir kristal birçok atom içereceğinden, kuantum kuramının mikro ölçekli bakış açısınca gerçekten son derece büyük sayılabilir. Kuantum mekaniğinin ilkelerinin bu tür sistemlere uygulanması, tek tek atomların özellikleriyle serbest biçimde hareket eden parçacıklar arasındaki yeni özellikleri açığa çıkaracaktır. Olası elektron enerjilerinin bir atomda farklı düzeylerdeki ayrık dizilere girdiklerini gördük. Öte yandan, serbest hareket eden bir elektron, gerçek deviniminin kinetik enerjisine karşılık gelen bir artı enerjiye sahip olabilir. Kristallerdeki elektronların enerji nitelikleri, bu iki aşırılık arasındaki bir tür anlaşmadır. Enerjinin olası değerleri bir bantlar dizisinde bulunabilir. Bir bantta süreklilik arz eden bir olasılıklar dizisi vardır; bantlar arasında elektronlar için kullanışlı olmayan enerjisiz düzeyler vardır. Özetle, elektronların bir kristaldeki enerji nitelikleri, değerlerin değişim gösteren izinli ve yasak aralık dizilerine karşılık gelir.

Bant yapısının varlığı, kristal katıların elektrik özelliklerini anlamak için bir çıkış noktası sunar. Elektrik akımları, katı içindeki elektronların harekete geçirilmesinden

kaynaklanır. Bir kristalin en yüksek enerji bandı tamamen dolu ise, elektron durumunun değiştirilmesi, elektronların yukarıdaki banttaki boşluğa doğru harekete geçirilmelerini gerektirir. Bu geçiş, her harekete geçirilen elektron için önemli bir enerji girişi talep edecektir. Bantları tamamen dolu bir kristal, etkide bulunmak kolay olmadığı için, bir yalıtkan gibi davranır. Bu kristalin elektronlarını harekete geçirmek zor olacaktır. Buna karşılık, eğer bir kristalin en yüksek bandı tamamen dolu değil ise, elektronlarını harekete geçirmek daha kolay olacaktır, çünkü elektronu biraz daha yüksek uygun enerji durumuna doğru harekete geçirmek yalnızca ufak bir enerji girişi gerektirecektir. Bu yapıdaki bir kristal, bir iletken gibi davranacaktır.

Gecikmeli seçim deneyleri

John Archibald Wheeler, "gecikmeli seçim deneyleri" dediği deneyleri irdeleyerek, üstdüşüm ilkesinin şaşırtıcı içerimlerini daha anlaşılır hale getirdi. Bu deneylere ilişkin olası bir düzenleme 9. resimde gösterilmektedir. Dar bir ışık demeti, A'da iki alt demete çatallanır. B ve C aynaları bu iki alt demeti D'de yeniden bir araya getirmek üzere yansıtır. İki yol arasındaki evre farkından (dalgalar uyumsuzlaştığından) dolayı D'de bir girişim örüntüsü meydana gelebilir. Başlangıçtaki demet herhangi bir zamanda aygıttan yalnızca bir tek foton geçirecek kadar zayıftır. D'deki girişim etkileri iki çakışık durum arasındaki girişimin sonucu olarak düşünülebilir: sağ-el yolu ve sol-el yolu. (II. Bölüm'deki çift yarık



9. Gecikmeli seçim deneyi.

deneyinin irdelenişiyle karşılaştırın.) Wheeler'ın tartıştığı yeni özellik, C ile D arasına bir X aleti konulması durumunda düzeneğin değiştirilmiş olup olmayacağını gündeme getirir. X, ya fotonun geçmesine izin veren ya da onu Y algılayıcısına yönlendiren bir anahtardır. Eğer anahtar onu iletmesi için konulursa, D'de bir girişim örüntüsünün oluştuğu önceki deney tekrarlanmış olur. Eğer anahtar onu yolundan saptırması için konulursa ve Y algılayıcısı bir foton kaydederse, D'de girişim örüntüsü oluşmaz, çünkü fotonun Y tarafından saptırılabilmesi için kesinlikle sağ-el yolunu izlemesi gerekmektedir. Wheeler, foton A'dan geçip havada yol alırken X'in yerleştirilmesinin seçilebilmesi gibi garip bir olguya dikkat çekti. Anahtar yerleştirimi seçilene kadar, foton, bir anlamda her iki seçeneği —hem sol hem de sağ el yollarını ya da bunlardan birini izlemeyi— destekler niteliktedir. Bu düşünceler doğrultusunda akıllıca deneyler yapılmaktadır.

Tarihler üzerinden hesaplama

Richard Feynman, kuantum kuramını farklı bir biçimde açıklamanın kendine özgü bir yolunu buldu. Feynman'ın farklı açıklaması, geleneksel yaklaşımla aynı kestirimlerde bulunsa da, bu sonuçların nasıl ortaya çıktıkları üzerine düşünmenin çok farklı bir yolunu önerir.

Klasik fizik, bize başlangıç noktası A'yı bitiş noktası B'ye bağlayan devinimin açık yörüngelerini, kendine özgü yollarını verir. Bu yörüngeler ve yollar, âdet olduğu üzere, Newton mekaniğinin ünlü eşitlikleri kullanılarak hesap-

lanırlar. 18. yüzyılda, izlenen yolun farklı yollarla birleştirilen belirli bir dinamik niceliğe asgari değeri veren A'yı B'ye bağlayan yörüngenin betimlenmesi yoluyla, farklı ama denk bir biçimde ifade edilebileceği bulundu. Bu nicelik "eylem" diye adlandırılmaktadır ve burada eylemin kesin tanımı üzerinde durmamız gerekmemektedir. En az eylem ilkesi (doğal bir biçimde bilindiği gibi), ışık ışınlarının iki nokta arasındaki mesafeyi en kısa zamanda alacak yolu seçme özelliğinin bir benzeridir. (Eğer kırılma yok ise, bu yol düz bir çizgidir; ama kırılmaya neden olan bir ortamda en az zaman ilkesi, bir bardak suyun içindeki bir çubuğun kırıkmış gibi gözükmesinde olduğu gibi, ışınların yakından bildiğimiz kırılmasına neden olur.)

Kuantum süreçlerinin tanımlanamamasından ötürü, kuantum parçacıklarının kesin yörüngeleri yoktur. Feynman, bu belirsizliğin önüne geçmek için, bir kuantum parçacığının A'dan B'ye *olası gitme biçimlerinin* (doğrudan ya da kıvrımlı, hızlı ya da yavaş) *hepsinin* tanımlanması gerektiğini savundu. Bu bakış açısına göre, klasik dalga işlevi düşüncesi, bütün bu olasılıkların katkılarının birbirine eklenmesinden çıkmıştı. Bu, "tarihler üzerinden toplama" betimlemesinin doğmasına neden oldu.

Bu kapsamlı hesaplamada terimlerin nasıl biçimlendirildiğinin ayrıntıları burada incelenemeyecek kadar tekniktir. Bir yolun katkısının, Planck sabitiyle bölünen bu yolla birleşen eylemle ilişkili olduğu açıktır. (Eylemin ve *h*'nin fiziksel boyutları aynı olduğu için, onların oranı fiziksel nicelikleri ölçmek için seçtiğimiz birimlerden bağımsız, saf bir sayıdır.) Farklı yolların katkılarının aldığı biçim öyledir ki, yakın yollar, katkılarının izlerindeki (daha

kesin olarak evrelerindeki) hızlı dalgalanmadan dolayı birbirlerini bozma eğilimindedir. İncelediğimiz sistem eylemi *h*'ye göre büyük bir sistem ise, en az eylem yolu daha çok katkıda bulunacaktır (çünkü bu yol dalgalanmaların en az olduğu ve dolayısıyla bozulma etkilerinin en aza indirildiği yola yakındır). Bu gözlem, niçin büyük sistemlerin klasik bir biçimde en az eylem yollarını izlediklerini anlamanın yalın bir yolunu bize göstermektedir.

Bu düşünceleri kesin ve hesap edilebilir bir biçimde ifade etmek kesinlikle kolay değildir. Olası yollar çokluğunun sunduğu değişim aralığının, yalnızca hesaplamanın yapıldığı kümelenme olmadığı kolaylıkla görülebilir. Bununla birlikte, tarihler üzerinden hesaplama yaklaşımının iki önemli sonucu vardı. Bunlardan biri, yaklaşımın Feynman'ı günümüzde herkesin "Feynman integrali" diye adlandırdığı, çok daha iyi yönetilebilen bir hesaplama tekniğini bulmaya yöneltmesidir. Kuantum hesaplamalarını fizikçiler için kullanışlı hale getiren Feynman integrali, son 50 yılın en yararlı kuantum yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, etkileşimlerin, enerji ve devinirlik değiştokuşundan dolayı, *edimsiz parçacıklar* diye adlandırılan parçacıklar tarafından taşındığı bir fizik tanımı ortaya koydu. "Edimsiz" sıfatının kullanılmasının nedeni, sürecin başlangıç ya da bitiş evresinde görünmeyen bụ ara parçacıkların fiziksel kütleye sahip olmaları gerekmese de, bütün olası kütle değerlerinin hesaplanabilmesidir.

Tarihler üzerinden hesaplama yaklaşımının bir başka üstünlüğü, daha geleneksel yaklaşımın sunduğunun aksine, problemi dile getirmenin daha açık bir yolunu önerdiği incelikli ve aldatmacalı kuantum sistemlerinin varlığıdır.

Uyumsuzluk hakkında daha fazlası

Uyumsuzluğa neden olan ışınımın heryerdelik özelliğine has çevresel etkilerin, ölçüm problemiyle arasındaki kısmi ilintiyi aşan bir önemi vardır. Son dönemde yaşanan önemli gelişmelerden biri de, bu çevresel etkilerin, kaotik sistemler temelindeki kuantum mekaniğinin nasıl düşünülmesi gerektiği üzerinde etkili olduklarının fark edilmesidir.

Doğanın barındırdığı içsel belirsizlikler yalnızca kuantum süreçlerinden doğmaz. Bunun fark edilmesi, yaklaşık 40 yıl önce, Newtoncu fizikte bile çok küçük bozulmaların etkilerine karşı sahip olduğu aşırı duyarlılıkları yüzünden takip eden davranışları bizim için kestirilemez kalan birçok sistemin bulunduğunu günışığına çıkardığında, birçok fizikçi için büyük bir sürpriz oldu bu. Bu kaotik sistemler (varsayıldıkları gibi) kısa bir süre içinde Heisenberg ölçüsünde bir belirsizlik düzeyindeki ya da daha aşağı düzeydeki ayrıntıya duyarlı hale gelirler. Yine de, kaotik sistemlerin kuantumcu bir bakış açısından incelenmesinin –*kuantum kaolojisi* diye adlandırılan konunun– birtakım sorunlarının olduğu görülmektedir.

Kafa karışıklığının nedeni, kaotik sistemlerin, geometrik niteliği ünlü fraktallere (bunun en iyi bilinen örneği yüzlerce psikedelik yaftaya konu olan Mandelbort dizisidir) karşılık gelecek biçimde davranmalarıdır. Fraktaller "kendine benzeş" diye adlandırılan şeylerdir, yani hangi ölçekle incelenirse incelensinler temelde aynı gözükürler (hiç durmamacasına testere dişlerinden oluşan testere dişleri). Dolayısıyla, fraktallerin doğal ölçeği

yoktur. Öte yandan, kuantum sistemlerinin Planck sabiti tarafından belirlenen doğal bir ölçeği vardır. Bu nedenle, kaos kuramı ile kuantum kuramı birbirlerine kolaylıkla uymazlar.

Yanlış bir eşleşme "kuantumun kaosu baskılaması" diye adlandırılan şeye yol açar: Kuantum düzeyinde kaotik sistemlerin davranışları, ayrıntıya dayanmaya başladıklarında değişim geçirir. Bu değişim de fizikçilerin başına başka bir dert açar. Bu sorunun en içinden çıkılmaz hali Satürn'ün Hyperion adlı 16. uydusu incelenirken karşımıza çıktı. Yaklaşık New York büyüklüğündeki bu patates biçimli kaya yumrusu kaotik bir biçimde hareket eder. Eğer kuantum baskılamasının kavramlarını Hyperion'a uygularsak, uydunun hatırı sayılır büyüklüğüne rağmen, beklenen sonuç şaşırtıcı biçimde doğru çıkmaktadır. Aslında, bu hesaplamaya göre, kaotik devinim yaklaşık olarak en fazla 37 yıl sürebilecektir. Gökbilimciler Hyperion'un fiili gerçekte bundan daha kısa süre devindiğini gözlemlediler; ama hiç kimse onun olağandışı, karmakarışık ilerleyişinin bu kadar çabuk sona ermesini beklemiyordu. İlk bakışta ciddi görünen bir sorunla karşı karşıyayız. Buna karşılık, uyumsuzluğun dikkate alınması bu sorunu çözecektir. Uyumsuzluğun olan biteni daha klasik bir görünüm arz edeceği yöne doğru yöneltme eğilimi, kuantumun kaosu baskılamasını baskılayan bir etkiye sahiptir. Hyperion'un daha uzun süre bu halde yol almasını rahatlıkla bekleyebiliriz.

Uyumsuzluğun neden olduğu hayli benzer bir başka etki, *kuantumun Zenon etkisi*dir. "Mikro gözlemlere" göre, radyoaktif bir çekirdek, çevresel fotonlarla etkileşime gir-

mesinin neden olduğu bozunmadan dolayı, başlangıçtaki durumuna geri dönmeye zorlanacaktır. Sürekli başlangıç noktasına geri dönmenin, deney yoluyla gözlemlenen bir olgu olan bozunmayı engelleme etkisi vardır. Bu etki, Antik Yunanlı felsefeci Zenon'un adlıyla bilinmektedir. Zenon bir okun *halihazırda* sabit bir noktada olduğu gözlemi üzerine düşünürken okun gerçekten hareket edemeyeceği sonucuna varmıştı.

Bu olgular, kuantum kuramı ile onun klasik sınırı arasındaki ilişkinin incelikli olduğunu, basite indirgeyen "büyük"-"küçük" ayrımıyla karakterize edilemeyecek etkilerin iç içe geçmesini kapsadığını açıkça göstermektedir.

Göreli kuantum kuramı

Spin ve istatistik kuramını irdeleyişimiz, kuantum kuramı ile özel görelilik kuramının bir araya getirilmesinin zengin içerikli bir birleşik kuram yarattığını zaten göstermişti. Bu iki kuramın birleşimini tutarlı bir biçimde dile getirmeyi başaran ilk eşitlik olan göreli elektron kuramı 1928 yılında Paul Dirac tarafından bulundu [12]. Bu eşitliğin matematiksel ayrıntıları bu tür bir kitapta anlatılamayacak kadar teknik olsa da, bu gelişmeden kaynaklanan iki önemli ve beklenilmeyen sonucun üzerinde durmalıyız.

Dirac, eşitliğini yalnızca kuantum kuramını ve göreli değişmezlik gereksinimini akılda tutarak geliştirdi. Dirac'ın bulduğu eşitliğe göre, elektronun elektromanyetik özelliklerine ilişkin kestirimler öyle bir niteliğe sahipti ki, elektronların manyetik etkileşimlerinin onu elektrik

yüküyle dönen minik bir topaç zannedenlerin saf beklentilerinden iki kat daha güçlü olduğu ortaya çıktı; bu sevindirici bir sürpriz olmuş olmalı. Görgül olarak bunun doğru olduğu zaten bilinmekteydi; ama aykırı görünen bu davranışın niçin böyle olması gerektiğini kimse anlamayı başaramamıştı.

İkinci, hatta daha önemli sonuç, Dirac'ın bozgun riskini mükemmel bir zafere dönüştürme ustalığından doğdu. Mevcut haliyle eşitliğin büyük bir kusuru vardı. Eşitlik, bir kimsenin onu gerçek elektronların davranışıyla ilintilendirmek için ihtiyaç duyacağı artı enerji durumlarına izin veriyordu; ama aynı zamanda eksi enerji durumlarına da izin vermekteydi. Eksi enerji durumları fizik için bir anlam ifade etmiyordu. Yine de, eksi enerji durumları kolaylıkla saf dışı edilemedi, çünkü kuantum mekaniğinin ilkeleri, fizik açısından kabul edilebilir olan artı enerji durumlarından eksi enerji durumlarına geçişe kaçınılmaz bir biçimde izin vermekteydi. Bu geçiş yıkıcı bir sonucun ortaya çıkmasına neden olmaktaydı. (Bu sonuç fizik açısından bir felaketti, çünkü bir tür denetim dışına çıkmış kesintisiz salınım makinesinin yol açtığı bu durumlara geçiş, sınırsız karşı-dengeleyici artı enerji nicelikleri üretebilirdi.) Bu sorun uzun bir süre fizikçileri bunalttı. Sonradan, Dirac, Fermi kaynaklı elektronlar istatistiğinin bu çıkmazdan kurtulmak için bir çıkış yolu sunduğunu fark etti. Büyük bir cesaretle bütün eksi enerji durumlarının zaten dolu olduklarını varsaydı. Dışlama ilkesi, artı enerji durumlarından eksi enerji durumlarına geçiş olasılığını ortadan kaldıracaktı. İnsanların boş uzay (boşluk) olarak düşündükleri şey, aslında, eksi enerjili elektronlar "deniz"iyle doluydu!

Dirac'ın varsayımı, biraz garip görünmekle birlikte, beklenen sonuçları daha az pitoresk ama aynı zamanda daha az karmaşık bir biçimde koruyarak kuantum kuramını ifade etmenin olanaklı olduğunu gösterdi. Bu sırada, negatif enerji denizi kavramıyla çalışmak Dirac'ı çok önemli bir buluşa götürdü. Sözgelimi, çok enerjik bir fotonla yeterli enerji sağlanırsa, negatif enerjili bir elektronu sıradan artı enerjili bir elektrona dönüştürerek onu bu denizden koparmak olanaklı hale gelir. O halde, bu sürecin eksi denizinde açtığı "deşik" nasıl davranacaktır? Eksi enerjinin yokluğu artı enerjinin mevcudiyetiyle aynı anlama geldiğinden (iki eksi bir artı ettiğinden), deşik artı-enerji parçacığı gibi davranacaktır. Ama eksi yükün yokluğu artı yükün mevcudiyetiyle aynı anlama geldiğinden, "deşik-parçacık", eksi yüklü elektronun aksine, artı yüklü olacaktır.

Temel parçacık fizikçilerinin 1930'lu yılların ortasındaki düşünüş tarzları, sonradan boy veren spekülatif özgürlüğe göre bayağı tutucuydu. Nitekim, o zamana dek bilinmeyen, yeni bir parçacığın var olduğunu ileri süren Dirac'ın düşüncesinden kesinlikle hoşlanmadılar. Bundan dolayı, başlangıçta Dirac'ın söz konusu ettiği artı parçacığın yalnızca çok iyi bilinen artı yüklü proton olabileceği varsayıldı. Gelgelelim, proton çok daha ağır iken, deşiğin kütlesinin elektronla aynı olmasının gerektiği fark edildi. Önerilen tek kabul edilebilir yorum, pek istenilmeyen bir kestirim olsa da, alelacele pozitron adı konulan bu bütünüyle yeni parçacığın elektron kütleli olmasına karşın artı yüklü olduğunun düşünülmesine neden oldu. Çok geçmeden kozmik ışınların içerisindeki pozitronlar belirlenince, parçacığın varlığı deney yoluyla da doğrulanmış oldu. (Aslında, örnekler çok

daha önce görülmüşlerdi; ama böyle anlaşılmamışlardı. Deneyciler aramadıkları şeyi görmekte zorlanırlar.)

Bu elektron-pozitron eşleşmesinin, doğadaki yaygın bir davranışın özel bir örneği olduğu fark edildi. Doğada hem (elektronlar gibi) madde hem de (pozitronlar gibi) zıt yüklü *karşımadde* vardır. "Karşı" öneki uygundur, çünkü bir elektron ile bir pozitron bir enerji patlaması içinde ortadan kaybolarak birbirlerini yok edebilirler. (Eski usul söylersek, elektron denizdeki deşiği doldurur ve ardından serbest kalan enerji uzağa ışır. Bunun tersine, gördüğümüz gibi, oldukça enerjik bir foton arkasında bir deşik bırakarak ve böylelikle bir elektron-pozitron çifti yaratarak bir elektronu denizden dışarıya kovabilir.)

Dirac eşitliği, ardındaki özgün güdülemede rolü bulunmayan manyetik özelliklerin açıklanmasına ve karşımaddenin bulunmasına öncülük etti. Nitekim, Dirac eşitliğinin verimli tarihi, gerçekten temel bir bilimsel düşüncenin sergileyebileceği uzun erimli bir değerliliğin sıradışı bir örneğidir. Fizikçileri gerçekten "kayda değer bir şeyle" uğraştıklarına, kimi felsefecilerin ve bilim sosyologlarının iddialarının aksine, sadece şeylere özel bir biçimde yaklaşmakla yetinmediklerine ikna eden, bu dikkate değer verimliliktir. Fizikçiler esas olarak fizik dünyasının gerçekte neye benzediğine ilişkin buluşlar yapmaktadır.

Kuantum alan kuramı

Dirac kuantum mekaniğinin ilkelerini parçacıklar yerine elektromanyetik alana uyguladığında başka bir temel

buluşta bulundu. Bu gelişme, kuantum alan kuramının bilinen ilk örneğini verdi. Geriye bakarak değerlendirildiğinde, bu adımı atmak teknik olarak çok zor değildir. Bir parçacık ile bir alan arasındaki temel farklılık, bir parçacık yalnızca sınırlı sayıda özgürlük derecelerine (durumlarının değişebildiği bağımsız biçimlere) sahipken, bir alanın sınırsız sayıda özgürlük derecesine sahip olmasıdır. Bu farklılığı ele almanın iyi bilinen matematiksel teknikleri vardır.

Kuantum alan kuramları gün geçtikçe dikkat değere olduklarını kanıtlamakta ve dalga/parçacık ikiliği üzerine olabildiğince aydınlatıcı biçimde düşünmemizi sağlamaktadır. Bir alan, uzaya ve zamana yayılan bir kendiliktir. Dolayısıyla, içsel olarak dalga karakterine sahip bir kendiliktir. Kuantum kuramının alana uygulanması, onun (enerji ve devinirlik gibi) fiziksel özelliklerinin kesintili, sayılabilir paketlerde (kuanta) mevcut hale gelmeleriyle sonuçlanır. Ama böyle bir sayılabilirlik bizim yalnızca parçacık davranışıyla birleştirdiğimiz bir şeydir. Bu nedenle, bir kuantum alanını incelerken, açıkça hem dalga hem de parçacık özellikleri gösteren bir kendiliği olabildiğince açık bir biçimde araştırmaya ve anlamaya çalışırız. Bu biraz da bir memelinin nasıl yumurtlayabildiği ve sonradan nasıl bir ornitorenk olarak tanımlandığı üzerine kafa yormaya benziyor. Gerçek bir örnek daima daha eğiticidir. Kuantum alan kuramında, dalga özelliği gösteren (teknik açıdan kesin evreleri olan) durumların *belirsiz* sayıda parçacık içeren durumlar oldukları ortaya çıktı. Bu sonuncu özellik, kuantum kuramının üstdüşüm ilkesi durumların farklı sayıda parçacıkla birleşmesine izin verdiği için, doğal bir olasılıktır. Gerçekten, mevcut parçacıkların sayısını sa-

yarak hesap etmeye çalıştığımız klasik kuramda olanaksız bir seçenektir bu.

Kuantum alan kuramında boşluğun tek tek önem arz eden alışmadık özellikleri vardır. Kuşkusuz, bir boşluk, parçacıklara yönelik uyarımların bulunmayacağı en düşük enerji durumudur. Bu anlamda boşlukta hiçbir şey bulunmasa da, bu, kuantum kuramında boşlukta hiçbir şey olmaz anlamına gelmez. Bunun nedeni ise şudur: Fourier çözümlemesi diye bilinen klasik matematik tekniği, bir alanı sınırlı bir uyumlu salıngaçlar toplamının muadili olarak kavramamıza olanak tanır. Her salıngacın kendisiyle bağdaşık özel bir frekansı vardır ve salıngaç sanki verili bir frekansa sahip bir sarkaçmış gibi devimli davranır. Boş alan, bütün bu "salınımların" en düşük enerji durumunda bulunduğu haldir. Klasik bir sarkaç için bu durum hareketsiz ve düşey durumda olmaktır. Bu, gerçekten, hiçbir şeyin olmadığı bir durumdur. Buna karşılık, kuantum mekaniği böylesine mükemmel bir dinginliğe izin vermez. Heisenberg, "salınımın" hem tanımlı bir konuma (aşağıda) hem de tanımlı bir momentuma (hareketsiz) sahip olmasına izin vermeyecektir. Bunun yerine, kuantum sarkacı (bütünüyle aşağıda ve hareketsiz olmasa da bu duruma yakın olduğu) en düşük enerji durumundayken de yavaş bir biçimde devinimde olmalıdır. Bileşke kuantum titreşmesi, *sıfır-noktası devinimi* diye adlandırılır. Bu düşüncelerin bir kuantum alanı olan sonsuz bir salıngaçlar dizisine birçok kez uygulanması, o boşluğun vızıldayan bir etkinlik kovanı olduğunu göstermektedir. Geçici 'parçaçıklar"ın belirdiği ve ortadan kaybolduğu sendelemeler süreklidir. Bir kuantum boşluğu, boş uzaydan daha çok bir sarkaca benzer.

Fizikçiler kuantum alan kuramını alanlar arasında etkileşimlerin olduğu durumlara uygulamaya kalkıştıklarında sorunlarla karşılaştılar. Sonsuz sayıdaki serbestlik dereceleri, sınırlı fiziksel nicelikler ne olmalı sorusuna sınırsız yanıt üretme eğilimindeydi. Bunun vuku bulduğu temel yollardan biri, durmamacasına sendeleyen boşlukla etkileşimdi. En sonunda, anlamsızdan anlam çıkarmak için bir yol bulundu. Belirli (*normalleştirilebilir* kuramlar diye adlandırılan) alan kuramları, yalnızca parçacıkların kütleleriyle ve bunların etkileşim güçleriyle bağdaşık, sınırlı sonsuzlar geliştirdi. Sonsuz terimleri silip yerlerine ilgili fiziksel niceliklerin ölçülmüş, sınırlı değerlerini koymak, matematiksel olarak tamamen arı bir yordam olmasa bile, anlamlı sonuçlar tanımlar. Bu yordam, deneyle çarpıcı bir uyum içinde olan sınırlı ifadeler de sağlamaktadır. Çoğu fizikçi bu pragmatik başarıdan dolayı mutlu. Ama Dirac'ın kendisi asla mutlu değildi. Biçimsel olarak sonsuz niceliklerle gerçekleştirilen bu kuşkulu mantık oyununa şiddetle karşı çıktı.

Günümüzde (kuark madde kuramı gibi) temel parçacık kuramlarının tamamı kuantum alan kuramıdır. Parçacıklar, temel alanın enerjik uyarımları sayılır. (Uygun bir alan kuramı, ayrıca, eksi enerjili elektronlar "denizi" meselesiyle başa çıkmanın doğru yolunu göstermektedir.)

Kuantum hesaplaması

Üstdüşüm özelliğini gelişmiş hesaplama gücüne ulaşmanın bir yolu olarak kullanma olasılığı oldukça ilgi çekmektedir.

Geleneksel hesaplama, biçimsel olarak 0'ların ve 1'lerin mantıksal birleşimleriyle ifade edilen ikili işlemlerin birleşimlerine dayanır; açık ya da kapalı anahtarlar üzerinden donanım (hardware) terimleriyle gerçekleştirilir. Bir anahtar ya kesinlikle açıktır ya da kesinlikle kapalıdır. Buna karşılık, kuantum dünyasında anahtar bu iki klasik olasılığın üstdüşümü olabilir. Bu tür bir üstdüşümler dizilişi, bütünüyle yeni bir koşut işleme karşılık gelmektedir. Bu kadar çok hesap balonunu havada tutma yeteneği, aynı zamanda ilke olarak hesaplama gücünde bir artışı temsil edebilir. Fazladan öğelerin eklenmesi, bu gücü alışılagelmiş durumlardaki doğrusal artışa göre katlamalı bir biçimde artıracaktır. Mevcut makinelerle olanaklı olmayan kod çözümleri ya da çok büyük sayıların çarpanlarına ayrılması (faktorizasyon) gibi birçok hesaplama işlemi olanaklı hale gelecektir.

Heyecan verici olasılıklar söz konusu. (Olasılıklardan umutlu olanlar, bu olasılıklar hakkında sanki süreç koşut evrenlerde gerçekleşiyormuş gibi birçok-dünya terimleriyle konuşma eğiliminde; ama, gerçekte, kuantum hesaplamasının uygulanabilirliğini sağlayan yalnızca üstdüşüm ilkesiymiş gibi görünüyor.) Buna karşılık, hâlâ çözülmemiş birçok problem olması nedeniyle, fiili uygulama açıkça ustalık isteyen bir iş olacaktır. Uyumsuzluk olgusu, bir kuantum hesabını istenmeyen çevresel müdahalelerden yalıtmanın ne kadar zor olduğunu göstermektedir. Kuantum hesaplaması teknolojik ve girişimci düşünce için ciddi bir ilgi odağı olsa da, etkili bir yordam bütünü olarak destekçilerinin gözündeki ışığı da canlı tutmaktadır.

V. Bölüm

BİRLİKTELİK

Einstein fotoelektrik açınlamasıyla kuantum kuramının büyükbabalarından biri olmuştu. Ama o torunundan hoşlanmadı. Fizikçilerin büyük çoğunluğu gibi Einstein da fiziksel dünyanın gerçekliğine derinden inanıyor ve onun doğasına ilişkin bilimsel açıklamaların doğruculuğuna güveniyordu. Ne var ki, Einsetin gerçekliğin Newtoncu düşüncenin varsaydığı bir tür naif nesnellikle güvence altına alınabileceğine inandı. Sonuç olarak, Einstein, Kopenhag ortodoksluğunun kuantum dünyasının doğasına atfettiği düzensiz belirsizlikten nefret etti.

Einstein, modern kuantum kuramına ilk saldırısını, bir biçimde Heisenberg belirsizlik ilkesinin sınırlamalarını aşmayı amaçlayan bir dizi yüksek düzeyli usta işi düşünce deneyi aracılığıyla gerçekleştirdi. Einstein'ın bu mücadeledeki hasmı, kuantum düşüncelerinin bu deneyin bütün boyutlarına eksiksiz biçimde uygulanmasının belirsizlik ilkesinin sağ salim ayakta kalmasıyla sonuçlandığını göstermeyi her seferinde başaran Niels Bohr'du. Mücadele,

Einstein'ın bu özel savaşı kaybettiğini kabul etmesiyle son buldu.

Einstein bir süre yaralarını sarmakla uğraştıktan sonra mücadele için yeni bir alan belirleyerek kavgaya geri döndü. Daha genç iki iş arkadaşı, Boris Podolsky ve Nathan Rosen'le birlikte, görünüşte oldukça ayrık iki parçacığın kuantum mekanik davranışının alışılmamış, o zamana kadar dikkat çekmemiş bazı uzun vadeli içerimlerinin olduğunu gösterdi. Bu içerimler, onları bulanların adlarıyla akılda kalan ve bizim EPR düşüncesi diye adlandırılabileceğimiz düşüncenin sonraki gelişimi izlenerek daha kolay açıklanmaktadır. David Bohm'a borçlu olunan bu sav, her ne kadar konuyla çok fazla ilgili olmasa da, irdelemeye değerdir.

Spinleri $\mathbf{s}_1$ ve $\mathbf{s}_2$ olan iki parçacığın bulunduğunu ve toplam spinin sıfır olduğunun bilindiğini varsayalım. Kuşkusuz, bu $\mathbf{s}_2$'nin $-\mathbf{s}$ olduğunu içerimlemektedir. Spin bir vektör olduğundan (yani büyüklüğü ve doğrultusu vardır – onu bir ok olarak düşünün), vektör niceliklerini yazarken kalıp yazıtipini kullanarak matematik geleneğini izledik. Dolayısıyla, bir spin vektörünün x, y, z olmak üzere üç seçili uzamsal doğrultuda ölçülen üç bileşeni olmalıdır. $\mathbf{s}_1$'in x bileşeni ölçüldüğünde s_{1x} sonucuna ulaşılıyorsa, $\mathbf{s}_2$'nin x bileşeni s_{2x} olmalıdır. Öte yandan, eğer $\mathbf{s}_1$'in y bileşeni ölçülüp s_{1y} sonucuna ulaşılmışsa, $\mathbf{s}_2$'nin y bileşenin s_{2y} olması gerektiği bilenecektir. Gelgelelim, kuantum mekaniği, aralarında bir belirsizlik ilişkisi olduğu için spinin x ve y bileşenlerinin eşzamanlı olarak ölçülmesine izin vermez. Bu, ortodoks kuantum düşüncesine göre doğru olabilirse de, Einstein, parçacık 1'de ne meydana gelirse gelsin, uzak

parçacık 2'yi doğrudan etkileyemeyeceğini savundu. EPR düşüncesine bakılırsa, 1 ile 2'nin uzamsal ayrıklığı, *1'de meydana gelenler ile 2'de meydana gelenlerin bağımsız olduğunu* içerimlemektedir. Einstein, bu sav doğru ise, ölçmek için 1'deki spinin x ya da y bileşenlerinden biri seçilebiliyorsa ve 2'deki spinden ayrı olarak x ya da y bileşenlerinin kesin bilgisine ulaşılabiliyorsa, ölçümler yapılmış olsa da olmasa da, parçacık 2'nin spin bileşenlerinin bu belirli değerlerde olması gerektiğini savundu. Bu, klasik kuantum kuramının kabul edemeyeceği bir savdı, çünkü, kurama göre, spinin x ve y bileşenleri arasındaki belirsizlik ilişkisi parçacık 1 için olduğu kadar parçacık 2 için de geçerliydi.

Einstein bu karmaşık uslamlamadan klasik kuantum kuramında eksik bir şeyler olması gerektiği sonucunu çıkardı. Uslamlama, Einstein'ın spin bileşenlerinin kesin değerleri olduğuna dönük düşüncesini açıklamayı başaramadı. Fizikçi arkadaşlarının hemen hepsi durumu farklı biçimde yorumladılar. Onlara göre, bir ölçüm gerçekleştirilene kadar ne s_1 ne de s_2 kesin spin bileşenlerine sahiptir. 1'in x bileşenin belirlenmesi 2'nin x bileşenini karşıt değer almaya zorlar. Yani 1'deki ölçüm, dalga işlevinin 2'deki çöküşünü spinin x bileşeninin karşı değerini almaya zorlar. 1'de ölçülmüş olan y bileşeni idiyse, 2'deki çöküş, spinin y bileşenin karşıtı olacaktı. Bu iki 2-durum (bilinen x bileşeni; bilinen y bileşeni) kesinlikle birbirlerinden ayrıdırlar. Nitekim, çoğunluk, *1'deki ölçümün 2'de spontane ve tamamıyla 1'de ne ölçüldüğüne bağlı bir değişime neden olduğu* sonucuna vardı. Bir başka deyişle, 1 ile 2 arasındaki ayrılıkta sezgilere aykırı bir birliktelik vardır. 1'deki eylemin 2'yi doğrudan etkileyen sonuçları vardır ve bu sonuçlar 1'deki farklı eylemler için

farklıdır. Bu genelde *EPR etkisi* diye adlandırılmaktadır. Bu terminoloji bir parça ironiktir, çünkü Einstein bu etkiyi fiziğin kabul edemeyeceği kadar "hayaletimsi" bularak böylesine geniş ölçekli bir bağlantıya inanmayı reddetti. Bu konu uzun süre bir daha gündeme gelmedi.

Bir sonraki adım John Bell tarafından atıldı. Bell, 1-2 sistemi (Einsetin'ın varsaydığı gibi) 1'deki özelliklerin yalnızca yerel olarak 1'de ne olduğuna ve 2'deki özelliklerin yalnızca yerel olarak 2'de ne olduğuna bağlı olması temelinde gerçekten ayrı bir sistem ise, bu sistemin özelliklerinin neler olabileceğini çözümledi. Bell, bu katı yerellik doğru ise, kuantum mekaniğinin belirli koşullarda ihlal edileceği kestiriminde bulunduğu ölçülebilir nicelikler arasında (günümüzde *Bell eşitsizlikleri* denen) kimi ilişkiler bulunabileceğini gösterdi. Bell'in bu buluşu, uslamlamayı düşünce deneyleri alanından laboratuarda araştırılabilir olanın görgül bağlamda ulaşılabilir alanına taşıyan çok önemli bir adımdı. Bu deneyleri yapması kolay değildi, ama, en sonunda, 1980'lerin başlarında Alain Aspect ve arkadaşları kuantum kuramının kestirimlerini doğrulayan ve Einstein'ın desteklediği tamamen yerel bir kuramın olabilirliğini olumsuzlayan, ustalıkla gereçlendirilmiş bir araştırma yapmayı başardılar. Böylece, fiziksel dünyada yerel olmamanın (non-locality) daha fazla indirgenemeyecek bir derecesi olduğu açık hale geldi. Birbirleriyle etkileşim halindeki kuantum kendilikleri, uzamsal olarak birbirlerinden alabildiğine ayrık olabilirlerse de, dolanık durumdadırlar. Sanki doğa durmak bilmeyen indirgemeciliğe karşı koymaktadır. Atomaltı dünyası bile tamamen atomcu bir yaklaşımla ele alınamaz.

EPR etkisinin içerimlediği, derinlere kök salan ilişkiselliğin fiziksel dünyanın temel yapısında mevcut olduğu savı, fizik düşüncesinin ve metafizik düşünmenin hâlâ sonuçlarını her yönüyle aydınlatarak tanımlamaya çalıştığı bir buluştur. Özümleme süreci sırasında EPR'nin içerimlediği bu dolanıklığın karakteri hakkında olabildiğince açık olmak zorunludur. Daha bilgece bir dille söylersek, EPR etkisi yalnızca bilgikuramsal değil, aynı zamanda varlıkbilgiseldir. Belli bir mesafeden bakınca, bilgideki artış kesinlikle sorunlu ya da şaşırtıcı değildir. Bir vazoda biri beyaz, diğeri siyah olmak üzere iki top olduğunu varsayalım. Siz ve ben vazonun içinden birer top alıp göremeyeceğimiz bir biçimde avucumuzda tutalım. Bir mil gittikten sonra avucunuzu açın ve sizde beyaz topun olduğunu görün. Bu durumda, siyah topun bende olduğunu o lahza bilirsiniz. Burada değişen tek şey bilgi durumunuzdur. En başından beri siyah top bende ve beyaz top sizdeydi; ama bunun böyle olduğunu şimdi fark ettiniz. Aksine, EPR etkisinde, 1'de olan 2'deki durumu *değiştirir*. Bu, elinizde kırmızı bir top bulsaydınız benim avucumda mavi bir top bulmamın gerekmesi gibidir; ama eğer yeşil bir top bulsaydınız benim sarı bir top bulmam gerekecekti ve avuçlarımızı açmadan önce ikimiz de belirli renkte toplara sahip değilizdir.

Dikkatli bir okuyucu, anlık değişim hakkında bütün bu söylenenlerden kuşkulanabilir. Özel görelilik en fazla ışık hızıyla hareket eden bir etkinin iletilmesi için gereken zaman geçene kadar 1'deki bir şeyin 2'yi etkilemesini yasaklamıyor mu? Pek sayılmaz. Göreliliğin fiilen yasakladığı, 2'deki bir saat ile 1'deki bir saatin doğrudan eşlemesine izin verecek anlık bilgi iletimidir. EPR türü dolanıklığın bu

tür iletilerin aktarılmasına izin vermediği görülmektedir. Bunun nedeni, ayrılıktaki birlikteliğin (togetherness-in-separation) 1'de olanla ile 2'de olan arasındaki bağlantılar biçimini alması ve bu bağlantılardan her iki tarafta ne olduğunun bilgisi olmaksızın bir ileti çıkarılamamasıdır. Bu, 1'deki bir şarkıcı notaları rasgele bir sırayla okurken 2'deki bir başka şarkıcının da notaları rasgele bir sırayla okumasına benzemektedir, bu iki şarkıcının birbiriyle bir tür uyum içinde oldukları yalnızca her ikisi birlikte duyulabilirse fark edilecektir. Durumun böyle olduğunu kavramamız, yanılgıya düşerek EPR'nin telepatinin olanaklı olduğunu "kanıtladığını" öne süren "aldatıcı kuantum" uslamlamasını benimsememek konusunda bizi uyarmaktadır.

VI. Bölüm

DERSLER VE ANLAMLAR

Kuantum kuramının bize sunduğu fiziksel süreç tanımı, gündelik deneyimin bizim için beklenir kıldığı şeyden köklü biçimde farklıdır.

Bu tanımın özelliği, aslında, atomaltı doğanın "gerçekte kendisine benzediği" şey olup olmadığı ya da kuantum mekaniğinin hesaplar yapmamızı olanaklı kılan garip ama elverişli bir konuşma tarzından başka bir şey olup olmadığı sorusunu belirli bir etkiyle sormasıdır. Klasik ölçüm aygıtlarının laboratuarda kullanılması yoluyla elde edilen sonuçlarla şaşırtıcı biçimde uyuşan yanıtlara ulaşabiliriz; buna karşın, belki de bu kurama gerçekten inanmamalıyız. Bu sorun, temelde bilimin kendi kaynaklarını kullanarak çözebileceği şeylerin ötesine uzanan, felsefece bir sorundur. Aslında, bu kuantum sorgulaması, gerçekçiler ile pozitivistler arasındaki temel bir felsefe tartışmasının –nadiren büyük bir ilgi uyandırsa da– özel bir örneğidir.

Pozitivizm ve gerçekçilik

Pozitivistler, bilimin rolünün gözlem verilerinin uzlaştırılması olduğu düşüncesindedir. Ölçüm araçlarının davranışını kesin ve uyumlu bir biçimde açıklayan kestirimlerde bulunuluyorsa, görev yerine getirilmektedir. Ontolojik sorular (oradaki şey gerçekten ne?) ilintisiz bir lükstür ve en iyisi bunları ıskartaya çıkarmaktır. Pozitivistin dünyası fotoğraf tabakalarının üzerindeki işaretlerle ve sayaç okumalarıyla doludur.

Bu bakış açısının uzun bir tarihi vardır. Kardinal Bellarmine, Galileo'ya, Copernicus sistemini yalnızca "görünüşü kurtarma"nın klasik bir aracı, gezegenlerin gökyüzünde nerede belireceklerini belirlemek için hesaplar yapmanın iyi bir yolu olarak görmesi gerektiği konusunda baskı yapmıştı. Galileo, yerkürenin gerçekten güneşin etrafında döndüğünü düşünmemeliydi – aksine, Copernicus'un varsayımı kullanışlı bir hesap aygıtı olarak görülmeliydi. Durumu idare etmeye yönelik bu öneri ne Galileo'ya çekici geldi ne de bilim insanları benzer önerileri genelde uygun gördüler. Eğer bilim yalnızca verileri ilişkilendirmek ise ve fiziksel dünyanın gerçekte neye benzediğini bize söylemiyorsa, bu girişimin niçin daima değerli görüldüğünü ve onun için neden bu denli çok zaman ve beceri harcandığını anlamak zor. Bilimin başarıları, bu ölçüde bir bağlılığı haklılaştırmak için çok yetersiz gibi görünmektedir. Dahası, bir kuramın görünüşü kurtarma becerisinin en doğal açıklanışı, kesinlikle durumların meydana gelme biçimleriyle benzerlik taşıması olacaktır.

Bununla birlikte, Niels Bohr kuantum kuramı hakkında ağırlıklı olarak pozitivist bir bakış açısından konuşuyor sayılır. Bohr bir keresinde bir arkadaşına şöyle yazmıştı:

> Kuantum dünyası yoktur. Yalnızca soyut bir fiziksel kuantum betimlemesi vardır. Fiziğin görevinin doğanın ne *olduğunu* bulup çıkarmak olduğunu düşünmek yanlıştır. Fizik, doğa hakkında ne söyleyebileceğimizle ilgilenir.

Bohr'un bütün ilgisini klasik ölçüm aygıtlarının rollerine yöneltmesi pozitivist nitelikte bir bakış acısını destekliyormuş gibi görülebilir. Bohr'un son yıllarında felsefi mesellerle yakından ilgilendiğini ve bunlar hakkında yazdığını gördük. Bu yazıların oluşturduğu bütünü yorumlamak zordur. Bohr'un felsefe alanındaki istidadı, bir fizikçi olarak sahip olduğu sıradışı yeteneğin çok altındaydı. Dahası, Bohr iki tür doğru olduğuna inandı ve bunları örneklendirdi: açıkça ifade edilebilen önemsiz doğrular ve hakkında muğlak bir biçimde konuşulabilen derin doğrular. Yorumcular Bohr'un yazılarını çeşitli biçimlerde yorumladılar. Bazıları, aslında, Bohr'un bir tür nitelikli gerçekçilik taraftarı olduğu hissine kapıldı.

Gerçekçiler, bilimin rolünün fiziksel dünyanın gerçekten neye benzediğini bulmak olduğu düşüncesindedirler. Bu asla tam anlamıyla yerine getirilemeyecek bir görevdir. Yeni fizik rejimleri (örneğin, daha yüksek enerjide karşı karşıya gelinenler) daima araştırılmayı bekliyor olacak ve bunlar beklenmedik davranış özelliklerine sahip olduklarını gösterecekler. Fiziğin başarılarının dürüst bir değerlen-

dirmesi, en fazla, bu başarıların mutlak doğruyu (fiziksel gerçekliğin bütünsel bir açıklamasını) değil, yaklaşık doğruyu (olguların sınırlı ama büyük ölçüde doğru bir açıklamasını) ortaya koyduğunu iddia edebilir. Fizikçiler, seçili bir ölçeğe göre yeterli olan kuramlar bulan fiziksel dünya haritacılarıdır, ama olan bitenin bütün boyutlarını tanımlayamazlar. Böylesi felsefece bir bakış açısı, fizik biliminin becerisinin fiili gerçekliği derinden kavramak olduğunu düşünür. Gerçekçinin dünyası elektronlarla, fotonlarla, kuarklarla ve gluonlarla doludur.

Pragmatizm, pozitivizm ile gerçekçilik arasında bir orta yol önerir. Pragmatizm, teknolojik bir olgu olan fiziğin birçok şeyi yapmamızı olanaklı kıldığını kabul etmekle beraber, dünyanın gerçekte neye benzediğini bildiğimizi düşünen gerçekçi konum kadar ileri gitmeyen felsefece bir konumdur. Bir pragmatist, bilimi ciddiye almamız gerekse de, ona inanacak kadar ileri gitmememiz gerektiğini söyleyebilir. Her şeye karşın, bilimin teknolojik başarısının kesinlikle en bariz açıklaması, maddenin gerçekte nasıl davrandığına ilişkin gerçeğe yakın bir kavrayışa temellenmiş olduğudur.

Bilimsel gerçekçiliği savunan birkaç savın üzerinde durulabilir. Daha önce de işaret ettiğimiz bir sav, gerçekçiliğin, fiziğin kestirim başarılarına, uzun dönemli verimliliğine ve fiziksel dünya tanımının ışığında yapılan birçok teknolojik aygıtın güvenilir bir biçimde çalışmasına doğal bir açıklama getirdiğini savunmaktadır. Gerçekçilik, bilimsel çabanın yüksek yetenekli birçok insanın hayatlarını buna adayacak kadar değerli görülmesinin nedenini açıklar; zira bilimsel çaba, mevcut olanın fiili bilgisini üreten bir etkinliktir. Gerçekçilik, bilim insanlarının buluşlar yap-

mayı deneyimlediklerine ve yalnızca daha iyi hesap yapma yollarını öğrenmediklerine ya da yalnızca durumları belirli bir biçimde görmek için kendi aralarında üstü kapalı uzlaşılara varmadıklarına duyulan inanca karşılık gelmektedir. Buluş inancı, bilim insanın önsel beklentisi karşısında doğanın sergilediği inatçılığın çok sık deneyimlenmesiyle güçlü bir biçimde doğdu. Fizikçiler olguya zihinlerindeki belirli düşüncelerle yaklaşabilirler. Ama amaçları fiziksel dünyanın gerçekte nasıl davrandığını bularak bu düşünceleri yanlışlamaktır. Doğa bizi üzerinde yeniden düşünmeye zorlar ve bu da bizi çoğunlukla olup bitenin bütünüyle beklenmedik karakterini nihai olarak bulmaya yönlendirir. Kuantum kuramının doğuşu, kuşku yok ki, fiziksel gerçekliğin bilim insanının düşünüşüne dayattığı revizyonizmin sıradışı bir örneğidir.

Kuantum kuramı, aslında, bize atomaltı dünyasının gerçekte neye benzediğini söylemekteyse, onun gerçekliği gündelik nesneler dünyasına yaklaşırken kullandığımız naif nesnellikten çok farklı bir gerçekliktir. Einstein'ın kabullenmekte zorlandığı nokta buydu. Einstein tutkulu bir biçimde fiziksel dünyanın gerçek olduğuna inandı. Ne ki, klasik kuantum kuramını reddetti, çünkü –yanlış bir biçimde– yalnızca nesnelin gerçek olabileceğini varsaydı.

Kuantum gerçekliği karakter olarak düzensiz ve belirsizdir. Fransız felsefeci-fizikçi Bernard d'Espagnat, kuantum gerçekliğinin doğasının "peçeli" olduğunu söylemişti. Werner Heisenberg, kuantum kuramının kurucularının felsefece gerçekten en donanımlı olanıydı. Aristoteles'ten *potentia* kavramını ödünç almanın yararlı olacağını o hissetmişti. Heisenberg şöyle yazdı:

Atom olayları üzerine yaptığımız deneylerde olgu durumlarıyla, gündelik yaşamdaki herhangi bir görüngü kadar gerçek olan görüngüyle ilgileniyoruz. Ama atomlar ya da temel parçacıklar gerçek değildir; bunlar, bir durumlar ve olgular dünyasından daha çok, bir gizil güçler ve olasılıklar dünyası oluşturuyor.

Bir elektron her zaman kesin bir konuma ya da kesin bir devinirliğe sahip değildir; daha çok, bir ölçümün gizil gücünü bir gerçekliğe dönüştürmesi koşuluyla bunlardan birini ya da ötekini sergileme potansiyeli vardır. Bu olgunun, bir elektronu bir masa ya da bir sandalye "gibi gerçek" kılmadığını düşünen Heisenberg'e katılmıyorum. Bir elektronun yalın bir biçimde kendi doğasına uygun, farklı bir gerçekliği vardır. Eğer durumları oldukları gibi bilmek istiyorsak, gerçekte ne olduklarını onların terimleriyle bilmeye ve dolayısıyla ifade etmeye hazırlıklı olmalıyız.

Gereğince kavrandığında neden hemen hemen bütün fizikçiler elektronların gerçekliğinde ayak diriyor? Bu inadın arkasında, bizim için aksi halde anlaşılmaz olarak kalacak büyük fizik deney alanlarını anlaşılır kılanın elektronlar ve onlara eşlik eden ama kolayca fark edilmeyen kuantum özellikleri olduğu varsayımının yattığını düşünüyorum. Bu varsayım, metallerin iletkenlik özelliğini, atomların kimyasal özelliklerini, elektron mikroskopu yapma yeteneğinimizi ve bunların yanı sıra birçok başka şeyi açıklamaktadır. Gerçeğin anahtarı (nesnellik değil) *anlaşılabilirliktir* – bu arada, anlaşılabilirlik, Aquinolu Tommaso'nun düşüncesinden kaynaklanan metafizik bir gelenekle uyumlu bir görüştür.

Elektronların doğasının özü olan peçeli gerçeklik, düşünüşümüze elektronlarla bağdaşık dalga işlevleri aracılığıyla sunulmaktdır. Bir fizikçi bir elektronun ne "yaptığı" hakkında düşündüğünde, aklında ona uygun dalga işlevi vardır. Açıkçası, dalga işlevi ne bir bilardo topunun nesnel mevcudiyeti kadar ulaşabilir bir kendiliktir ne de kuantum düşünüşünde onu yalnızca bir hesaplama aygıtı olarak gören pozitivist anlayışla uyumlu bir biçimde işler. Hayaletimsi dalga işlevi, kuantum gerçekliğinin peçeli gizil gücünün taşıyıcısı olmaya uygun bir gereç gibi görünmektedir.

Ussallık

Eğer kuantum araştırmaları bir şey öğrettiyse, bu, dünyanın sürprizlerle dolu olduğudur. Hiç kimse, bazen dalga bazen de parçacıkmış gibi davranan kendiliklerin söz konusu olabileceğini önceden varsayamazdı. Bu ayrımsama, fiili görgül deneyin uzlaşmaz zorunluluğu tarafından fizik topluluğuna dayatıldı. Bohr'un bir keresinde söylediği gibi, dünya yalnızca düşündüğümüzden değil, düşünebileceğimizden de garip. Kuantum dünyasına uygulandığında mantığın bile değiştirilmesi gerektiğine daha önce işaret etmiştik.

"Sağduyunun ölçüsüz tiranlığına hayır", kuantum fiziği için iyi bir slogan olabilir. Bu coşkulu düstur, geçerliliği yalnızca kuantum alanıyla sınırlı olmayan bir ileti taşımaktadır. Bize ussal öngörü güçlerimizin oldukça miyop olduklarını anımsatıyor. Bir bilim insanının, ister bilim içinden

ister bilim dışından olsun, gerçekliğin bir boyutu için önerilen açıklama hakkında sorması gereken içgüdüsel soru, sanki usun alması gereken biçimi önceden biliyormuşuz gibi "onun ussal olup olmadığı" değildir. Aksine, uygun soru şudur: "Bunun doğru olabileceğini düşünmenize neden olan nedir?" Çok daha açık uçlu olan bu soru, köktenci bir sürpriz olasılığını ortadan kaldırmaz, iddianın kanıta dayanılarak savunulmasında ısrar eder.

Eğer kuantum kuramı neyin ussal olduğuna ilişkin anlayışımızı değişimlere açık tutmamız için bizi cesaretlendirmekteyse, aynı zamanda evrensel bir bilgikuramı olmadığını, bilgiye ulaşmayı umabileceğimiz tek bir egemen yol olmadığını kabul etmemiz için de cesaret vermektedir. Gündelik dünyayı Newtoncu açıklığı içinde bilebilmemize karşın, kuantum dünyasını ancak Heisenbergci belirsizliğiyle kabul etmeye hazırsak bilebiliriz. Elektronların nesnel bir açıklamasında ayak diretmemiz, yalnızca başarısız olmamıza neden olabilir. Bir tür bilgikuramsal döngü söz konusudur: Bir kendiliği bilme biçimimiz kendiliğin doğasıyla uyumlu olmalıdır; kendiliğin doğası onun hakkında bildiklerimiz aracılığıyla ortaya çıkarılır. Bu incelikli döngüsellikten kaçış söz konusu değildir. Kuantum kuramı örneği, döngünün kötü huylu değil, iyi huylu olduğu inancını desteklemektedir.

Metafiziksel ölçüt

Başarılı fizik kuramları deneysel olgularla uyum içinde olma yeteneğini sergileyebilmelidir. Nihai anlamda görü-

nüşü kurtarmak, bu amaca giden yolda (Dirac'ın başlangıçta görgül açıdan yıkıcı gibi görünen eksi enerjili elektron durumları temelindeki kestirimle karşı karşıya kaldığında olduğu gibi) sorunların yaşandığı geçici dönemler olabilse de, zorunlu bir başarıdır. Bir kuram (Dirac'ın elektronların mıknatıs özelliklerini açıklayışı ve pozitron kestirimi gibi) yeni ya da beklenmedik bir görüngüyü kestirebildiğini ya da onun anlaşılmasını sağlayabildiğini gösterdiğinde kuramın daimi verimlilik özelliği ikna edici olacaktır.

Yine de, görgül başarılar, her zaman tek başına bir bilim topluluğunun bir kuramı onaylamasının yeterli ölçütü değildir. Kuantum kuramının belirlenimci olmayan yorumu ile belirlenimci yorumu arasındaki seçim bu temellerde yapılamaz. Bohm da Bohr kadar görünüşü kurtarır. İkisi arasındaki sorun başka nedenlere dayandırılmalıdır. Kararın fiziksel ölçümlerin yanı sıra metafizik yargıya da dayandığı giderek açıklık kazanmaktadır.

Bilim topluluğunun bir kuramı değerlendirirken göz önüne aldığı metafizik ölçüt şunları içerir:

(1) Kapsam

Kuram, olguları olabildiğince geniş açıklamalıdır. Bohr ve Bohm örneğinde (her ne kadar Bohmcu düşüncenin dalga işlevi hesabının başlangıç olasılıklarını doğru verdiğine inancını kanıtlamak için açıklamasını daha iyi uslamlamalarla tamamlanmaya ihtiyacı olduğuna dikkat çekilmesi gerekse de), bu iki sonuç dizisi görgül açıdan eşit oldukları için bu ölçüt bunlar arasındaki sorunu çözmez.

(2) Ekonomi

Daha özlü ve daha tutumlu bir kuram daha çekici gözükecektir. Bohm'un kuramı, gözlenebilir parçacıklara gizli dalga varsayımını eklediği için ekonomik bakımdan daha az başarılıdır. Birçok fizikçi, kendiliklerin bu denli çoğaltılmasını kuramın ilgi çekmeyen bir özelliği olarak görmektedir.

(3) Sadelik

Doğallık özelliğine eklenebilecek bu nosyon, yersiz bir gösterişten kaçınmaya dayanır. Çoğu fizikçi, Bohmcu düşünceyi en çok bu temelde sorunlu bulmaktadır. Özellikle Schrödinger eşitliğinin Bohmcu dalga için *ad hoc* ama zorunlu bir eşitlik olarak kullanılması ona sevimsiz bir fırsatçı havası vermektedir.

Bu ölçütlerin kaynağı fiziğin dışındadır ve aynı zamanda değerlendirilmeleri kişisel bir yargı meselesidir. Bu ölçütlerin karşılanması resmi bir protokolün yerine getirilmesine indirgenebilecek bir konu değildir. Değerlendirilmeleri bir bilgisayara havale edilebilecek bir yargı meselesi değildir. Kuantum fizikçileri topluluğunun Bohr'un lehine ve Bohm'un aleyhine bir karara varması, bilim felsefecisi Michael Polanyi'nin "kişisel bilgi"nin bilimde oynadığı rol diye atıfta bulunduğu olgunun paradigmatik örneğidir. Felsefeye yönelmeden önce seçkin bir fizik kimyacısı olan Polanyi, bilimin konusu kişisel olmayan fiziksel dünya olsa da, bilim yapmanın kaçınılmaz bir biçimde kişilerin

bir etkinliği olduğunu vurguladı. Çünkü, bilim etkinliği, yalnızca hakikatin peşinde koşan bilim insanları topluluğu içinde uzun bir süre çıraklık yapmış kişilerin sahip olabileceği zımni yeteneklerin uygulanmasını gerektiren birçok yargıyı içerir. Bu yargılar, yalnızca bizim tartıştığımız türden metafizik ölçütlerin uygulanmasıyla ilgili değildir. Çok daha gündelik düzeyde, bu yargılar, deneycinin başka bir durumda deneyin sonuçlarını bozabilecek "artyetişim" etkilerini değerlendirme ve ortadan kaldırma yeteneği gibi becerileri de içerir. Deneyciye bunu nasıl yapacağını söyleyen küçük bir kılavuz kitap yoktur. Bu, deneyimle öğrenilen bir şeydir. Polanyi'nin sık sık tekrarladığı gibi, konu ister bisiklete binmek, ister şarap uzmanlığı, isterse başarılı fizik deneyleri tasarlamak ve gerçekleştirmek becerileri olsun, hepimiz "söyleyebileceğimizden daha fazlasını bilmekteyiz".

Bütüncülük

V. Bölüm'de EPR etkisinin kuantum dünyasında içsel bir yerel olmama olduğunu gösterdiğini gördük. Ayrıca, uyumsuzluk olgusunun genel çevrenin kuantum kendilikleri üzerindeki şaşırtıcı etkilerini anlaşılır kıldığını gördük. Her ne kadar kuantum fiziği "çok küçüğün" fiziği olsa da, bu, kesinlikle onun gerçekliğin yalnızca atomik, "parçalar halindeki" açıklamasını onayladığı anlamına gelmemektedir.

Fizik (daha geniş bir dünya görüşü olan) metafiziği belirlemez, ama onu bir temelin üzerinde yükselen yapıyı tamamen belirlemese de sınırlaması gibi sınırlar. Felsefece

düşünme, kuantum kuramının bu bütüncü boyutlarının içerimlerini yeterince dikkate almadı. Bu içerimler, kuşku yok ki, hem yapı taşlarının aslında temel parçacıklar olduğunu, hem de parçacıkların birleşimlerinin kurucu bir tanımlamanın ileri süreceğinden daha tümleşik bir gerçekliğe imkân tanıdığını fark etmeye muktedir bir doğal dünya açıklamasına ulaşmanın zorunlu olduğunu destekler.

Gözlemcinin rolü

Kuantum kuramının "gözlemci eliyle yaratıldığı" sık sık tekrarlanan bir klişedir. Daha dikkatli bir düşünüş, bu iddiayı sınırlandıracak ve yanlışlayacaktır. Söylenebilecek şeyler, büyük ölçüde, hangi ölçüm süreci yorumunun seçildiğine dayanacaktır. Ölçümler arasındaki temel sorun budur, çünkü Schrödinger eşitliği kusursuzca süreksiz ve belirli bir biçimde aşama kaydeden bir kuantum sistemi betimlemektedir. Ölçümün genel tanımının, mikro ölçekli bir durumun imleminin tersinmez ve makro ölçekli bir kaydı olduğunu hatırlamak da önemlidir. Ölçüm bir gözlemciyi içerebilirse de, genelde ona ihtiyaç duymaz.

Yalnızca bilinçli yorum, bilinçli bir gözlemcinin etkinliklerine özgün bir rol atfeder. Diğer bütün gözlemler fiziksel sürecin bir kimsenin mevcudiyetini gerektirmeyen boyutlarıyla ilgilenir. Hatta bilinçli yorumda bile gözlemcinin rolü ne ölçüleceğine ilişkin bilinçli bir seçim yapmakla ve çıkacak sonucu bilinçsizce ileri sürmekle sınırlıdır. Gerçeklik yalnızca zaten mevcut olan kuantum gizil gücünün sınırları içinde dönüştürülebilir.

Yeni Kopenhag okulunun görüşüne göre, deneyci kullanacağı araçları seçerek neyi ölçeceğini seçer, ama sonuca bu araçlar kapsamındaki makro ölçekli fiziksel süreçler tarafından karar verilir. Bunun tersine, eğer GRW'nin yeni fiziği geçerliyse, fiili sonucu rasgele süreç belirler. Bohmcu kuram doğruysa, gözlemcinin rolü yalnızca zaten açık bir biçimde ortada olanın görülmesidir. Birçok-dünya yorumunda, fiziksel gerçeklik tarafından etki altında tutulan, geniş portfolyosundaki bütün olası sonuçların gerçekleştirildiği bütün bu koşut evrenlerde var olması için kopyalanan gözlemcidir.

Gözlemcinin rolüne ilişkin olası farklı açıklamaları birleştiren ortak bir etken yoktur. En fazla, "gözlemci eliyle yaratılan gerçeklik" hakkında konuşmaktan kaçınarak "gözlemcinin etkilediği gerçeklik" üzerinde durmak yerinde olacaktır.

Bu meseleyle bağlantılı olarak, Doğu düşüncesindeki *maya* anlayışıyla kuantum kuramı arasında kurulan koşutluk uyarınca öne sürülen, kuantum dünyası maddesel olmayanın "çözünen dünyası"dır savı da sorgulanmalıdır. Bu, bir tür yarı-gerçektir. Kuantumun, potansiyel kuantum anlayışında oynadığı varsayılan rolle birlikte irdelenen bir "peçelilik" söz konusudur. Yine de, kuantum dünyasının aynı ölçüde dikkate alınması gereken direngen boyutları da vardır. Enerji ve devinirlik gibi fiziksel nicelikler kuantum kuramında klasik fizikteki kadar korunmaktadır. Kuantum mekaniğinin ilk zaferlerinden birinin atomların kararlılığını açıklamak olduğunu da anımsayalım. Kuantumun dışlama ilkesi, periyodik cetvelin sabit yapısını desteklemektedir. Hiçbir suretle bütün kuantum dünyası belirsizlik içinde kaybolup gitmemektedir.

Bu bölümü düşünsel sağlığa ilişkin bir uyarıyla sonlandırmak uygun olacak gibi görünüyor. Kuantum kuramı kesinlikle garip ve şaşırtıcıdır, ama "her şey mümkün" diyecek kadar da garip değildir. Kuşkusuz, hiç kimse böyle bir hamlıkla tartışmaz, ama bu karikatürümsü tutumu benimsemeye tehlikeli biçimde yaklaşan bir söylem söz konusu. Bu yaklaşım, "aldatıcı kuantum" diye adlandırılabilir. Kuantum içgörüsüne ağırbaşlılıkla başvurulmasının uygun olacağını öne sürmek istiyorum.

EPR etkisinin telepatiye bir açıklama önermediğini görmüştük, zira onun zorluğu bilgi aktarımını kolaylaştıracak düzeyde değildir. Beyindeki kuantum süreçlerinin insan bilincinin varoluşuyla bazı bağlantıları olabilir; ama atomaltının rastgele belirsizliği, aslında bir failin özgür istenciyle eylemesinden çok farklıdır. Görünüşteki paradoksal karakteri kuantum alan kuramının içgörüleri tarafından çözülen dalga/parçacık ikiliği fazlasıyla şaşırtıcı ve aydınlatıcı bir görüngüdür. Buna karşılık, kuantum alan kuramı, çelişkili görünen herhangi bir kavram çiftini hoşumuza gitti diye duraksamadan kucaklamamıza izin vermez. Güçlü bir ilaç gibi, kuantum kuramı da gereğince uygulandığında mükemmel, istismar edildiğinde ve yanlış uygulandığında korkunçtur.

İLERİ OKUMA ÖNERİLERİ

Kuantum kuramı üzerine azımsanmayacak sayıda kitap bulunmaktadır. Aşağıdaki liste, daha ileri düzeyde içgörüler peşinde olan bir okuyucunun başvurmayı faydalı bulabileceği kısa bir kişisel seçki içeriyor.

Matematiğe elinizdeki kitaptan daha fazla yer verse de popüler tarzdaki kitaplar:

T. Hey ve P. Walters, *The Quantum Universe* (Cambridge University Press, 1987)

J. C. Polkinghorne, *The Quantum World* (Penguin, 1990)

M. Rae, *Quantum Physics: Illusion or Reality?* (Cambridge University Press, 1986)

Matematiği profesyonel düzeyde kullanırken yorum konuları üzerinde ders kitaplarından daha fazla duran bir kitap:

C. J. Isham, *Lectures on Quantum Theory: Mathematical and Structural Foundations* (Imperial College Press, 1995)

Kuantum kuramının kurucularından birinin klasik bir sunumu:

P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4. basım. (Oxford University Press, 1958)

Yorum konularının felsefi bir incelikle irdelenişi:

B. d'Espagnat, *Reality and the Physicist: Knowledge, Duration and the Quantum World* (Cambridge University Press, 1989)

Bilim felsefesine çok daha genel bir giriş:

W. H. Newton-Smith, *The Rationality of Science* (Routledge and Kegan Paul, 1981)

Newton-Smith'in gözardı ettiği Michael Polanyi'nin düşüncesi şurada bulunabilir:

M. Polanyi, *Personal Knowledge* (Routledge and Kegan Paul, 1958)

Kuantum kuramının Bohmcu uyarlaması üzerinde özellikle duran kitaplar:

D. Bohm ve B. Hiley, *The Undivided Universe* (Routledge, 1993)

J. T. Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony* (University of Chicago Press, 1994)

Kuruculardan ikisinin düşünce yüklü yazıları:

N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge* (Wiley, 1958)

W. Heisenberg, *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science* (Allen & Unwin, 1958)

Önemli kuantum fizikçilerinin yaşamöyküleri:

A. Pais, *Niels Bohr's Times in Physics, Philosophy and Polity* (Oxford University Press, 1991)

H. S. Kragh, *Dirac: A Scientific Biography* (Cambridge University Press, 1990)

A. Pais, '*Subtle is the Lord...*': *The Science and Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, 1982)

J. Gleick, *Genius: The Life and Science of Richard Feynman* (Pantheon, 1992)

D. C. Cassidy, *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg* (W. H. Freeman, 1992)

W. Moore, *Schrödinger: Life and Thought* (Cambridge University Press, 1989)

SÖZLÜKÇE

Bu sözlükçe, genel olarak, kendisini metinde yinelenen ya da temel kuantum kuramı anlayışı için özel önem taşıyan terimleri tanımlamakla sınırlandırdı. Yalnızca bir kere geçen ya da daha az önem taşıyan terimler metin içinde tanımlandılar.

açısal devinirlik (*angular momentum*): Dairesel devinimin ölçüsü dinamik nicelik.

Balmer formülü (*Balmer formula*): Hidrojen izgesindeki belirgin çizgilerin frekansının basit bir formülü.

belirsizlik ilkesi (*uncertainty principle*): Kuantum kuramında *gözlenebilir öğelerin* her üyesinin eşanlı olarak ve kesin doğrulukla ölçülemeyen (konum ve devinirlik, zaman ve enerji gibi) ikililerde gruplandırılabileceği olgusu. *Planck sabiti*nin koyduğu eşanlı doğruluk sınırı ölçütü.

Bell eşitsizlikleri (*Bell inequalities*): Yerel olmayan bağıntılardan arınmış, karakter olarak kesinlikle yerel bir kuramda yerine getirilmesi gereken koşullar.

bilgikuramı (*epistemology*): Ne bilebildiğimizin anlamının felsefece irdelenişi.

Bohmcu kuram (*Bohmian theory*): David Bohm'un öne sürdüğü, kuantum kuramının belirlenimci yorumu.

birçok-dünya yorumu (*many-worlds interpretation*): Ölçümün bütün olası sonuçlarının fiilen farklı koşut dünyalarda gerçekleştiği bir kuantum kuramı yorumu.

bozonlar (*bosons*): Parçacık *dalga işlevleri* bakışımlı olan parçacıklar.

dalga işlevi (*wavefunction*): Bir durumun kuantum kuramındaki en kullanışlı matematiksel temsili. *Schrödinger eşitliği*nin çözümü.

dalga paketinin çökmesi (*collapse of the wavepacket*): Ölçme işleminin *dalga işlevi*nde neden olduğu aralıklı değişim.

dalga/parçacık ikiliği (*wave/particle duality*): Kendilikler bazen parçacık biçiminde bazen de dalga biçiminde davranabilirler yollu kuantum ilkesi.

dışlama ilkesi (*exclusion principle*): İki *fermiyon* (örneğin iki elektron) aynı durumda olamaz koşulu.

EPR etkisi (*EPR effect*): Birbirini etkileyen iki kuantum kendiliği, birbirlerinden çok uzak olabilse de, karşılıklı olarak birbirlerini etkileme güçlerini muhafaza ederler yollu, sezgi karşıtı sonuç.

uyumsuzluk (*decoherence*): Kuantum sistemleri üzerindeki, klasik nitelikli bir davranışı hızla güdüleyebilen çevresel etki.

fermiyonlar (*fermions*): Parçacık *dalga işlevleri* tersbakışımlı olan parçacıklar.

gerçekçilik (*realism*): Bilimin bize fiziksel dünyanın gerçekte neye benzediğini söylediğini savunan felsefe bakışı.

girişim görüngüleri (*interference phenomena*): Dalgaların pekiştirmeyle (uyumlu dalgalarla) ya da yok etmeyle (uyumsuz dalgalar) sonuçlanabilecek kombinasyonundan doğan etkiler.

gizli değişkenler (*hidden variables*): Belirlenimci bir kuantum kuramı yorumunda fiilen olup bitenlerin belirlenmesine yardım eden, gözlenemeyen nicelikler.

gözlenebilirler (*observables*): Deney yoluyla ölçülebilen nicelikler.

ışınım (*radiation*): Elektromanyetik alanın taşıdığı enerji.

istatistik (*statistics*): Özdeş parçacıklardan oluşan sistemlerin davranışı.

istatistiksel fizik (*statistical physics*): Karmaşık sistemlerin davranış yığınının en olası durumlar temelinde ele alınması.

kaos kuramı (*chaos theory*): Sahip olduğu aşırı duyarlılık ilerideki davranışlarını özünde kestirilemez kılan sistemlerin fiziği.

klasik fizik (*classical physics*): Isaac Newton'un bulduğu belirlenimci ve tanımlanabilir fizik kuramı.

Kopenhag yorumu (*Copenhagen interpretation*): Niels Bohr kaynaklı, belirsizliği ve klasik ölçüm aygıtlarının ölçümdeki rolünü vurgulayan bir kuantum yorumları ailesi.

kuantum alan kuramı (*quantum field theory*): Kuantum kuramının elektromanyetik gibi alanlara ya da elektronla bağdaşık bir alana uygulanması.

kuantum kaolojisi (*quantum chaology*): Kaotik sistemler temelli kuantum mekaniğinin tam olarak anlaşılmayan konusu.

kuarklar ve gluonlar (*quarks and gluons*): Nükleer maddenin temel bileşenleri için önerilen adaylar.

ontoloji (*ontology*): Varlığın doğasının felsefece irdelenişi.

ölçüm sorunu (*measurement problem*): Kuantum yorumunda, her ölçümde kesin bir sonuca ulaşıldığının nasıl anlaşıldığını konu edinen tartışma.

öndelemesiz (*non-commuting*): Çarpım sırasının önemli olması özelliği, yani AB'nin çarpımının BA'nın çarpıyla aynı olmaması.

Planck sabiti (*Planck's constant*): Kuantum kuramının ölçütünü koyan yeni temel fizik sabiti.

pozitivizm (*positivism*): Bilimin yalnızca doğrudan gözlenen görüngüleri ilişkilendirmekle ilgilendiğini savunan felsefe bakışı.

pragmatizm (*pragmatism*): Bilimin gerçekte teknik açıdan neyin ne kadar başarıldığıyla ilgilendiğini savunan felsefe bakışı.

Schrödinger eşitliği (*Schrödinger equation*): *Dalga işlevinin* zamanla nasıl değiştiğini belirleyen temel kuantum kuramı eşitliği.

serbestlik derecesi (*degrees of freedom*): Dinamik sistemin devinim sırasında değişebildiği farklı, bağımsız biçimler.

spin (*spin*): Temel parçacıkların sahip olduğu içsel *açısal devinirlik.*

tamamlayıcılık (*complementarity*): Niels Bohr'un epeyce üzerinde durduğu, bir kuantum sisteminin farklı ve karşılıklı olarak dışlayıcı yollarla düşünebileceği olgusu.

üstdüşüm (*superposition*): *Klasik fizikte* iç içe geçmelerine izin verilmeyen durumların birbirlerine eklenmesine izin veren temel kuantum kuramı ilkesi.

MATEMATİK EKİ

Matematiğe çok az değinen ana metindeki çeşitli noktaları aydınlatacak bazı yalın matematik ayrıntılarını bunlardan yararlanmak isteyenler için bu ekte kısaca gösteriyorum. (Başlıklar metinde bölüm numaralarıyla belirtilmektedir.) Bu ek, okuyuculardan, cebir eşitliklerinden kalkülüs notasyonlarına uzanan temel bir bilgi talep etmektedir.

1. Balmer formülü

Formülü Rydberg tarafından yazılan biraz daha değişik biçimiyle vermek daha faydalı olacaktır. Eğer v_n, görünen hidrojen izgesindeki n'inci (n tam değerler, 3, 4, ... alır) çizginin frekansı ise,

$$vn = cR\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), \qquad (1.1)$$

olur. Burada, c, ışığın hızı ve R, Rydberg diye adlandırılan sabittir. Sonradan, formülün iki terimin ayrımı olarak

bu biçimde ifade edilmesinin akıllıca olduğu ortaya çıktı. İlk terimin, $1/1^2$, $1/3^2$ ve benzeri olduğu diğer izge dizileri daha sonra tanımlandı.

2. Fotoelektrik etki

Planck'a göre, bir saniyede ν kere salınan elektromanyetik ışınım $h\nu$ enerji kuantasında salınır. Burada h Planck sabitidir ve $6.63.10^{-34}$ jul-saniye gibi küçük bir değerdedir. (ν'nin yerine açısal sıklık ω: $2\pi\nu$ konulursa, formül $\hbar = h/2\pi$ olduğu $\hbar\omega$ haline gelir. Bu formül çoğunlukla Planck sabiti diye adlandırılmaktadır ve "h bar" ya da "h kesmesi" diye ifade edilmektedir.)

Einstein, enerji kuantasının kalıcı bir varlığa sahip olduğunu varsaydı. Eğer ışınım metal üzerine düşerse, metaldeki elektronlardan biri enerji yüklenerek bir kuantum massedecektir. Elektronun metalden kaçmak için ihtiyaç duyduğu enerji W ise, $h\nu > W$ olunca kaçış gerçekleşecek, $h\nu < W$ olunca kaçış olanaksız olacaktır. Dolayısıyla, gelen ışınım denetimi yoğun olsa da, elektronların salınması için belirli bir frekansın($\nu_0 = W/h$) üzerinde olması gerekir. Demet bu frekansın üzerindeyse, oldukça zayıf olsa bile, elektron salınır.

Saf bir ışınım dalga kuramı bütünüyle farklı davranış gösterir, çünkü elektrona taşınan enerjinin demetin frekansına değil, yoğunluğuna bağlı olması beklenir.

Fotoelektrik salımın gözlenen özellikleri, dalga tanımının değil, parça tanımının kestirimleriyle uyumludur.

3. Bohr atomu

Bohr, hidrojen atomunun e yüklü bir protonun etrafında dönen $-e$ yüklü ve m kütleli bir elektrondan oluştuğunu varsaydı. Protonun kütlesi, elektronun deviniminin etkisinin yoksanmasına yetecek kadar büyüktür (elektronun kütlesinin 1.836 katıdır). Çemberin yarıçapı r ise ve elektronun hızı v ise, elektrostatik çekimin merkezkaç ivmeye karşı dengelenmesi şunu verir:

$$\frac{e^2}{r^2} = m\frac{v^2}{r}, \text{ ya da } e^2 = mv^2 r. \qquad (3.1)$$

Elektronun enerjisi, kinetik enerjisi ile elektrostatik potansiyel enerjisinin toplamıdır ve şunu verir:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{e^2}{r}, \qquad (3.2)$$

(3.1) kullanılarak şöyle yazılabilir,

$$E = \frac{-e^2}{2r}. \qquad (3.3)$$

Bohr, ayrıca, elektronun açısal devinirliğinin Planck sabiti $\hbar$'nin çokkatlı entegrali olmasını gerektiren yeni bir kuantum koşulu öne sürdü:

$$mvr = n\hbar \text{ (n=1, 2,. . .)} \qquad (3.4)$$

Karşılık gelen olası enerji şudur:

$$E_n = \frac{-e^4 m}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \qquad (3.5)$$

n durumundan durum 2'ye doğru hareket eden bir elektron tek bir foton olarak salındığında enerji bırakılırsa, bu fotonun frekansı şu olur:

$$v_n = c. \frac{e^4 m}{4\pi\hbar^3 c} \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \cdot \qquad (3.6)$$

Bu, yalnızca Balmer formülüdür (1.1). Bohr, bu formülü açıkladığı gibi Rydberg sabiti *R*'nin diğer bilinen fizik sabitlerine dayanılarak hesaplanmasını da olanaklı kıldı:

$$R = \frac{e^4 m}{4\pi\hbar^3 c}, \qquad (3.7)$$

R, deney yoluyla ulaşılan değerle uyuşan bir sayıdır. Bohr'un buluşu, yeni kuantumun düşünce tarzının dikkat çekici bir zaferini temsil etti.

[Schrödinger eşitliğini (bkz. VI. bölüm) kullanan kuantum mekaniği temelli hidrojen atomu hesaplamasında kesintili enerji düzeyleri açık bir dizinin uyumlu frekanslarına benzerlik göstermekle beraber biraz farklı biçimde oluşurlar ve n sayısı açısal devinirlikle çok daha dolaylı olarak ilişkilidir.]

4. Yer değiştirmeyen operatörler

Heisenberg'in kullandığı matrisler genelde birbirleriyle yer değiştirmez, ama, en sonunda, kuantum kuramının değişmeyen diferansiyel operatörlerin biçimciliğe dâhil edildiği daha ileri düzeyde bir genellemeyi gerektirdiği ortaya çıkmıştır. Fizikçileri Hilbert uzayı matematiğini kullanmaya yönlendiren de bu gelişmedir.

Genelde, kuantum mekaniğinin formülleri x konumu ve p devinirliği için izleyen ikameler konularak klasik fizik formüllerinden elde edilebilir:

$$x \to x$$

$$p \to -i\hbar\frac{\partial}{\partial x}. \qquad (4.1)$$

Klasik fiziğin konumlar ve devinimler için saptadığı sayılar için rutin bir biçimde geçerli olan yer değiştirme özelliğinin aksine (4.1), diferansiyel operatör $\partial/\partial x$ ortaya çıkınca x ve p değişkenleri birbirinin yerine geçmez. $\partial/\partial x$ solda olduğunda sağındaki herhangi bir kendilik gibi sağındaki x'i de farklılaştırdığından ötürü şöyle yazabiliriz:

$$\frac{\partial}{\partial x}\cdot x - x\cdot\frac{\partial}{\partial x} = 1. \qquad (4.2)$$

Değişeç parantezi $[p,x] = p.x - x.p$ tanımlayarak şöyle yazabiliriz:

$$[p,x] = -ih. \qquad (4.3)$$

Bu ilişki, *nicelem koşulu* olarak bilinmektedir. Dikkatli bir okur başka bir formülün (4.3) şöyle verilebileceğini fark edecektir:

$$x \to ih \frac{\partial}{\partial p}, \tag{4.3}$$

$$p \to p$$

Dirac, kuantum mekaniğini ifade etmenin birçok denk yolunun bulunduğunu özellikle vurguladı.

5. de Broglie dalgaları

Planck formülü

$$E = hv \tag{5.1}$$

enerjiyi birim *zaman* aralığı titreşim sayısına orantısal kılar. Görelilik kuramı, uzay-ve-zamanı, devinim-ve-enerjiyi doğal dört misli birleşimler olarak paranteze alır. Bu nedenle, genç de Broglie kuantum kuramında devinirliğin birim *uzay* aralığı titreşim sayısına orantısal olması gerektiğini öne sürdü. Bu, λ'nin dalga boyu olduğu şu formülü verir:

$$p = \frac{h}{\lambda}, \tag{5.2}$$

(5.1) ile (5.2) eşitlikleri birlikte, parçacık özellikleriyle (E ve p) dalga özelliklerini (v ve λ) ilişkilendirmenin bir yolu-

nu verir. λ dalga boyunun dalga biçiminin uzamsal bağımlılığı şöyle verilir:

$$e^{i2\pi x/\lambda} \tag{5.3}$$

(4.1) ile (5.3)'ün birleştirilmesi (5.2)'yi yeniden verir.

6. Schrödinger eşitliği

Bir parçacığın enerjisi, kinetik enerjisi (p, mv ise, ½ mv^2 = ½ p^2/m'dir) ile [(genelde x, $V(x)$'nin işlevi olarak yazabileceğimiz)] potansiyel enerjisinin toplamıdır. Enerji ile zaman arasındaki (4.1) benzer kuantum mekanik ilişki şöyledir:

$$E \rightarrow ih = \frac{\partial}{\partial t} \cdot \tag{6.1}$$

Dalga biçiminin zaman bağımlılığının sağa kayması ve uzamsal bağımlılığa (5.3) karşılık gelmesi nedeniyle (6.1) ile (4.1) arasında ortaya çıkan ifade farklılığı şudur:

$$e^{-i2\pi v t,} \tag{6.2}$$

dolayısıyla (6.1)'deki artı işaretinin $E = hv$'yi vermesi gerekir.

E= ½ $mv^2 + V$'yi kuantum mekanik dalga işlevi ψ için diferansiyel bir eşitliğe dönüştürmek üzere (4.1) ile (6.1)'in kullanılması şunu verir:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+V(x)\right]\psi, \tag{6.3a}$$

bir uzay boyutunda

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+V(x)\right]\psi, \tag{6.3b}$$

vektör x = (x, y, z)'nin üç boyutlu uzayında

$$\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}. \tag{6.4}$$

Schrödinger'in eşitlikleri olan bu ifadeler, ilk başta onun tarafından farklı bir uslamlama doğrultusunda yazıldı. (6.3) eşitliklerindeki köşeli parantezlerin içindeki operatör *Hamiltoncu* diye adlandırılır.

(6.3) eşitliklerinin ψ'de *doğrusal eşitlikler* olduğuna, yani eğer ψ_1 ve ψ_2 iki sonuç iseler, her λ_1 ve λ_2 sayı çifti için

$$\lambda_1\psi_1+\lambda_2\psi_2 \tag{6.5}$$

olduğuna dikkat edin.

Max Born, dalga işlevinin olası bir dalganın temsili yorumu olduğunun altını çizdi. *x* noktasında bir parçacık bulma olasılığı, karşılık gelen (karmaşık) dalga işlevinin modülünün karesiyle orantılıdır.

7. Doğrusal uzaylar

VI. Bölüm'ün sonunda doğrusallık özelliğinin kuantum kuramının temel bir karakteristiği olduğuna ve üstdüşüm özelliğinin temeli olduğuna işaret ettik. Dirac, kuramı soyut vektör uzayları aracılığıyla formülleştirerek dalga işlevlerine dayanan düşünceleri genelleştirdi.

Bir dizi $|a_i>$ vektörü, eğer bunların birleşimi

$$\lambda_1|a_1> \lambda_2|a_2+ \ldots, \tag{7.1}$$

ise ve aynı zamanda λ_i'in rasgele (karmaşık) sayılar olduğu bir uzaya bağlıysa, bir *vektör uzayı* oluşturur. Dirac bu vektörleri öneyler (*kets*) diye adlandırdı. Bunlar Schrödinger'in dalga işlevleri ψ'nin genelleştirmeleridir. Aynı zamanda öneylerle karşı doğrusal biçimde ilişkili olan ikili bir "ardaylar" uzayı vardır.

$$\sum_i \lambda_i|a_i> \rightarrow \sum_i < a_i| \lambda_i^* \tag{7.2}$$

λ_i^*, λ_i'in karmaşık eşleneğidir. (Köşeli parantez $< a_1|$, dalga işlevleri ψ^*'nin karmaşık eşleneğidir.) Bir arday ile öney arasında (arday/öney vererek – Dirac bunu küçük bir şaka olarak gördü) sayıl bir sonuç oluşturulabilir. Bu, dalga işlevi terimlerinde integral $\int\psi_i^*\psi_2 dx$'e karşılık gelir. Bu $<a_1|a_2>$ biçiminde gösterilir ve

$$<a_1|a_2> = <a_2|a_1>^* \tag{7.3}$$

özelliği vardır. (7.3)'den $<a|a>$'nın gerçek bir sayı olduğu

çıkar ve aslında kuantum kuramında bunun artı olması ($|\psi|^2$'ye karşılık gelmesi) koşulu dayatılır.

Bir fizik durumu ile öney arasındaki ilişki *ışın temsili* diye adlandırılan şeydir ve $|a>$ ile $\lambda|a>$'nın herhangi bir sıfır olmayan karmaşık sayı λ için aynı fizik durumunu temsil ettiği anlamına gelir.

8. Özvektörler ve özdeğerler

Vektör uzaylarındaki operatörler, öneyleri başka öneylere çevirme etkileri tarafından tanımlanırlar:

$$O|a> = |a'>. \tag{8.1}$$

Kuantum kuramında operatörler, gözlenebilir niceliklerin biçimcilik içindeki temsil biçimdir [bir dalga işlevini etkileyen operatörlerle (4.1) karşılaştırın]. Önemli ifadeler ("matris öğeleri" diye adlandırılan; bunlar olasılık genlikleriyle ilişkilidir) arday-operatör-öney "sandviçleri"nden çıkan sayılardır:

$$<\beta|O|a> \tag{8.2}$$

Bir operatörün *Hermisyen eşleniği* O' matris öğeleri arasındaki ilişki tarafından belirlenir:

$$<\beta|O|a> = <a|O^{\dagger}|\beta>^{*}. \tag{8.3}$$

Hermisyen eşleniği olan operatörlere özel önem atfedilir:

$$O^{\dagger} = O. \tag{8.4}$$

Bunlar, *Hermisyen* diye adlandırılır ve yalnızca bu tür operatörler fiziksel gözlenebilir değerleri temsil ederler.

Fiili gözlemlerin sonuçları daima gerçek sayı olduğu için, bu şemayı fiziksel olarak anlamlı kılmak üzere sayılarla operatörleri birleştirmenin bir yolu olmalıdır. Bu yol *özvektörler* ve *özdeğerler* düşünceleri kullanılarak oluşturulur. Eğer bir O operatörü, öney $|a>$'yı kendisinin sayısal katına çeviriyorsa, yani

$$O|a> = \lambda|a>, \tag{8.5}$$

ise $|a>$'nın O'nun λ özdeğerine sahip özvektörü olduğu söylenir. Hermisyen operatörlerin daima gerçek sayılar oldukları gösterilebilir.

Bu matematik olgularının fiziksel yorumu, bir gözlenebilirin gerçek özdeğerlerinin gözlenebilirin ölçülerek elde edilebilen olası sonuçları olduğu ve birleşik özvektörlerin bu özel sonuçların kesin bir biçimde (bir olasılıkla) elde edileceği fiziksel durumlara karşılık geldiği yönündedir. Karşılık gelen operatörleri yer değiştiren gözlenebilirlerden yalnızca iki tanesi eşzamanlı ölçülebilir.

9. Belirsizlik ilişkileri

Gama-ışını mikroskobunun incelenmesi, kuantum ölçümünün gözlemciyi iyi uzamsal çözünürlük (kısa dalga boyu) ile küçük bozulma (düşük frekans) arasında denge

kurmaya mecbur bıraktığını gösterdi. Bu dengenin niceliksel terimlerle ifade edilmesi, Δx konumundaki belirsizlik ile Δp devinimdeki belirsizliğin, büyüklüğü Planck sabiti $\hbar$ 'nin istediğinden daha az olan Δx. Δp sonucuna sahip olamayacağının bulunduğu Heisenberg belirsizlik ilişkilerini verir.

10. Schrödinger ve Heisenberg

H Hamiltoncu (enerji operatörü) ise, Shrödinger eşitliği şöyle olur:

$$ih\frac{\partial \mid a, t}{\partial t} = H \mid a, t > . \qquad (10.1)$$

Eğer *H* genellikle olduğu gibi açık bir biçimde zamana dayanmıyorsa, (10.1) biçimsel olarak

$$|a, t> = e^{-iHt/h}|\mathrm{a}, \mathrm{O}>. \qquad (10.2)$$

yazılarak çözülebilir.

Kuramın bütün fizik sonuçları $<\mathrm{a}|\mathrm{O}|\beta>$ biçiminin matris öğelerinin özelliklerinden doğar. Zaman bağımlılığının (10.2) açık bir biçimde tam yazılması şu sonucu verir:

$$<a, \mathrm{O}|\ e^{iHt/h} . \mathrm{O} . e^{-iHt/h}\ |\beta, \mathrm{O}>. \qquad (10.3)$$

Terimlerin farklı bir biçimde bir araya getirilmesi şunu verir:

$$<a, O| .e^{iHt/h} Oe^{-iHt/h}. |\beta, O> \qquad (10.4)$$

Zaman bağımlılığının bir zaman bağımlı operatöre dayandığı yerde,

$$O(t) = e^{iHt/h} Oe^{-iHt/h} \qquad (10.5)$$

olur.

(10.5) diferansiyel eşitliğin çözümü olarak ele alınabilir.

$$ih\frac{\partial O(t)}{\partial t} = OH - HO = [O, H] \qquad (10.6)$$

Kuantum kuramının zaman bağımlılığın durumlardan çok operatör gözlenebilirlerle bağdaşık düşünülmesi, Heisenberg'in özgün yaklaşım tarzıdır. Bu bölümdeki tartışma, kuantum kuramının iki büyük kurucusunun başlangıçta soruyu ele alışları çok farklı gözükse de yaklaşımlarının aynı olduğunu gösterdi.

11. İstatistik

1 ile 2 özdeş ve ayırt edilemez parçacıklar iseler, $|1, 2>$ ve $|2, 1>$ aynı fizik durumuna karşılık gelir. Bu, biçimciliğin ışın görünge karakterinden ötürü (bkz. VII. Bölüm) şunu verir:

$$|2, 1> = \lambda\, |1, 2> \qquad (11.1)$$

Burada λ sayıdır. Buna karşılık, 1 ve 2'nin iki sefer yer değiştirmesi kesinlikle değişiklik yaratmaz ve o tam olarak özgün konuma geri dönmelidir. Dolayısıyla,

$$\lambda^2 = 1\text{'nin} \tag{11. 2}$$

iki olasılığı, yani $\lambda = +1$ (Bose istatistiği) ya da $\lambda = -1$ (Fermi istatistiği) olasılıklarını vereceği doğru olmalıdır.

12. Dirac eşitliği

Westminster Abbey'de Paul Dirac'ın anısına dikilen yazıtta şu eşitlik kazılıdır:

$$i\gamma\partial\psi = m\psi. \tag{12.1}$$

Bu eşitlik, onun ($h = 1$ olduğunu saptayan kuantum kuramına özgü fizik birimlerini kullanarak) dört boyutlu uzay zamanı notasyonuyla elektronlar için yazdığı ünlü göreli dalga eşitliği kuramıdır. $\hbar$'ler 4 matrisle 4'türler ve ψ [2 (spin) kere 2'nin (elektron/pozitron) verdiği] dört bileşenli spinor diye adlandırılan şeydir. Bu konuyu böylesi bir giriş kitabında ele alabileceğimiz kadar ele aldık; ama okuyucu, ister kâğıt, ister sayfa, isterse Abbey'deki taşın üstünde olsun, fiziğin en güzel ve en temel eşitliklerinden biri olan bu eşitliğe saygı göstermek için bir fırsat bulmalıdır.

KÜLTÜR KİTAPLIĞI

1- **SOKRATES**, Louis-André Dorion, Mart 2005
2- **NAPOLÉON**, Thierry Lentz, Mart 2005
3- **BİLİM-KURGU**, Jacques Baudou, Mart 2005
4- **ANADOLU UYGARLIKLARI**, Marc Desti, Nisan 2005
5- **PSİKANALİZ**, Daniel Lagache, Nisan 2005
6- **SOSYAL BİLİMLER**, Dominique Desjeux, Nisan 2005
7- **HİTİTLER**, Isabelle Klock-Fontanille, Mayıs 2005
8- **SOSYAL PSİKOLOJİ**, Jean Maisonneuve, Mayıs 2005
9- **YUNAN MİTOLOJİSİ**, Pierre Grimal, Mayıs 2005
10- **EMPRESYONİZM**, Marina Ferretti Bocquillon, Haziran 2005
11- **MEZHEPLER**, Nathalie Luca, Haziran 2005
12- **ŞARABIN TARİHİ**, Jean-François Gautier, Haziran 2005
13- **FELSEFE AKIMLARI**, Dominique Folscheid, Temmuz 2005
14- **JEAN-PAUL SARTRE**, Annie Cohen-Solal, Temmuz 2005
15- **HAÇLILAR**, Cécile Morrisson, Temmuz 2005
16- **İNGİLİZ EDEBİYATI**, Jean Raimond, Ağustos 2005
17- **ÜNİVERSİTELERİN TARİHİ**, C. Charle & J. Verger, Ağustos 2005
18- **CAZ**, Lucien Malson & Christian Bellest, Ağustos 2005
19- **TAPINAK ŞÖVALYELERİ**, Régine Pernoud, Eylül 2005
20- **ÇAĞDAŞ SANAT**, Anne Cauquelin, Eylül 2005
21- **BİLİM TARİHİ**, Pascal Acot, Eylül 2005
22- **DİNLER**, Paul Poupard, Ekim 2005
23- **ANTROPOLOJİ**, Marc Augé & Jean-Paul Colleyn, Ekim 2005
24- **KAPİTALİZM**, Claude Jessua, Ekim 2005
25- **BLUES**, Gérard Herzhaft, Kasım 2005
26- **NIETZSCHE**, Jean Granier, Kasım 2005
27- **JEOPOLİTİK**, Alexandre Defay, Kasım 2005
28- **RUS EDEBİYATI**, Jean Bonamour, Mart 2006
29- **BİLİM FELSEFESİ**, Dominique Lecourt, Mart 2006
30- **BUDACILIK**, Henri Arvon, Mart 2006
31- **BABİL**, Béatrice André-Salvini, Nisan 2006
32- **FANTASTİK EDEBİYAT**, Jean-Luc Steinmetz, Nisan 2006
33- **ANKSİYETE VE KAYGI**, André Le Gall, Nisan 2006
34- **ÇOCUK PSİKOLOJİSİ**, Olivier Houdé, Mayıs 2006

35- **SCHOPENHAUER**, Edouard Sans, Mayıs 2006
36- **ANTİK MISIR**, Sophie Desplancques, Mayıs 2006
37- **VİKİNGLER**, Pierre Bauduin, Haziran 2006
38- **VAROLUŞÇULUK**, Jacques Colette, Haziran 2006
39- **SANAT TARİHİ**, Xavier Barral I Altet, Haziran 2006
40- **ROMA İMPARATORLUĞU**, Patrick Le Roux, Temmuz 2006
41- **KIERKEGAARD**, Olivier Cauly, Temmuz 2006
42- **ALMAN EDEBİYATI**, Jean-Louis Bandet, Temmuz 2006
43- **MAYALAR**, Paul Gendrop, Ağustos 2006
44- **MİMARLIK TARİHİ**, Gérard Monnier, Ağustos 2006
45- **DİYABET**, Jean & Charles Darnaud, Ağustos 2006
46- **AVRUPA BİRLİĞİ**, Jean-Luc Mathieu, Eylül 2006
47- **DİLBİLİM**, Jean Perrot, Eylül 2006
48- **AZTEKLER**, Jacques Soustelle, Eylül 2006
49- **DADA VE GERÇEKÜSTÜCÜLÜK**, David Hopkins, Kasım 2006
50- **KÜRESELLEŞME**, Manfred B. Steger, Kasım 2006
51- **HAYVAN HAKLARI**, David DeGrazia, Kasım 2006
52- **HIRİSTİYANLIK**, Linda Woodhead, Aralık 2006
53- **GAZETECİLİK**, Ian Hargreaves, Aralık 2006
54- **EVRİM**, Brian & Deborah Charlesworth, Aralık 2006
55- **İSPANYA İÇ SAVAŞI**, Pierre Vilar, Ocak 2007
56- **YARATICILIK**, Michel-Louis Rouquette, Ocak 2007
57- **FELSEFENİN DOĞUŞU**, Giorgio Colli, Ocak 2007
58- **ANTİK FELSEFE**, Jean-Paul Dumont, Şubat 2007
59- **İNKALAR**, Henri Favre, Şubat 2007
60- **YAZIN KURAMI**, Jonathan Culler, Şubat 2007
61- **SOSYAL VE KÜLTÜREL ANTROPOLOJİ**, Monaghan & Just, Nisan 2007
62- **SPINOZA**, Roger Scruton, Nisan 2007
63- **TANGO**, Remi Hess, Nisan 2007
64- **İTALYAN EDEBİYATI**, Christian Bec & François Livi, Mayıs 2007
65- **DARWIN VE DARWINCİLİK**, Patrick Tort, Mayıs 2007
66- **SİYONİZM**, Ilan Greilsammer, Mayıs 2007
67- **FOBİLER**, Paul Denis, Ağustos 2007
68- **KLASİK SANAT**, Mary Beard & John Henderson, Ağustos 2007
69- **PLATON VE AKADEMİA**, Jean Brun, Ağustos 2007
70- **HABERMAS**, James Gordon Finlayson, Eylül 2007

71- **FREUD**, Roland Jaccard, Eylül 2007
72- **KAFKA**, Ritchie Robertson, Eylül 2007
73- **FENOMENOLOJİ**, Jean-François Lyotard, Ekim 2007
74- **EROTİZM**, Roger Dadoun, Ekim 2007
75- **TARİH**, John H. Arnold, Ekim 2007
76- **HOMEROS**, Jacqueline de Romilly, Aralık 2007
77- **ARİSTOTELES VE LİSE**, Jean Brun, Aralık 2007
78- **ANARŞİZM**, Colin Ward, Aralık 2007
79- **BİZANS TARİHİ**, Jean-Claude Cheynet, Mart 2008
80- **BARTHES**, Jonathan Culler, Haziran 2008
81- **ŞİZOFRENİ**, Marc-Louis Bourgeois, Haziran 2008
82- **İSLAM**, Dominique Sourdel, Eylül 2008
83- **SANAT KURAMI**, Cynthia Freeland, Eylül 2008
84- **PLATON**, Jean-François Mattéi, Eylül 2008
85- **FEMİNİZM**, Margaret Walters, Ocak 2009
86- **DESCARTES**, Tom Sorell, Ocak 2009
87- **KELTLER**, Venceslas Kruta, Ocak 2009
88- **MAX WEBER**, Laurent Fleury, Temmuz 2009
89- **RETORİK**, Michel Meyer, Temmuz 2009
90- **DEVLET**, Renaud Denoix de Saint Marc, Temmuz 2009
91- **SALSA VE LATİN CAZ**, Isabelle Leymarie, Ocak 2010
92- **FOUCAULT**, Gary Gutting, Ocak 2010
93- **İNSAN HAKLARI**, Andrew Clapham, Ocak 2010
94- **POETİKA**, Michel Jarrety, Mayıs 2010
95- **RUS DEVRİMİ**, S. A. Smith, Mayıs 2010
96- **FOTOĞRAF**, Roger Bellone, Mayıs 2010
97- **GALILEO**, Georges Minois, Ağustos 2010
98- **EPİSTEMOLOJİ**, Hervé Barreau, Ağustos 2010
99- **KEYNES VE KEYNESÇİLİK**, Pierre Delfaud, Ağustos 2010
100- **HEGEL VE HEGELCİLİK**, Jean-François Kervégan, Mart 2011
101- **ERGEN DEPRESYONU**, Henri Chabrol, Mart 2011
102- **MODA**, Dominique Waquet & Marion Laporte, Mart 2011
103- **LOCKE**, John Dunn, Ağustos 2011
104- **KÜRESEL ISINMA**, Mark Maslin, Ağustos 2011
105- **BAROK**, Victor-Lucien Tapié, Ağustos 2011
106- **BHAGAVADGITA**, Anonim, Eylül 2011

107- **HİNDUİZM**, Korhan Kaya, Eylül 2011
108- **İKTİSAT**, Partha Dasgupta, Eylül 2011
109- **SHAKESPEARE**, Germaine Greer, Aralık 2011
110- **SENFONİ**, Rémi Jacobs, Aralık 2011
111- **HUKUK FELSEFESİ**, Michel Troper, Aralık 2011
112- **RAMAYANA**, Anonim, Ocak 2012
113- **DEMOKRASİ**, Bernard Crick, Mart 2012
114- **FRANKFURT OKULU**, Paul-Laurent Assoun, Mart 2012
115- **KİTABIN TARİHİ**, Albert Labarre, Mart 2012
116- **MİT**, Robert A. Segal, Haziran 2012
117- **MODERN ÇİN**, Rana Mitter, Haziran 2012
118- **DÜŞLER**, J. Allan Hobson, Haziran 2012
119- **RÖNESANS**, Jerry Brotton, Kasım 2012
120- **PARANOYA**, Sophie de Mijolla-Mellor, Kasım 2012
121- **KITA FELSEFESİ**, Simon Critchley, Kasım 2012
122- **İDEOLOJİ**, Michael Freeden, Aralık 2012
123- **RÖNESANS SANATI**, Geraldine A. Johnson, Aralık 2012
124- **SOĞUK SAVAŞ**, Robert J. McMahon, Mart 2013
125- **MARX**, Peter Singer, Mart 2013
126- **POSTYAPISALCILIK**, Catherine Belsey, Mart 2013
127- **YUNAN SANATI**, Jean-Jacques Maffre, Haziran 2013
128- **MATEMATİK**, Timothy Gowers, Haziran 2013
129- **PSİKİYATRİ TARİHİ**, Jacques Hochmann, Haziran 2013
130- **ORTAÇAĞ FELSEFESİ**, Alain de Libéra, Ağustos 2013
131- **TASARIM**, John Heskett, Ağustos 2013
132- **TRAJEDİ**, Adrian Poole, Ekim 2013
133- **MODERNİZM**, Christopher Butler, Ekim 2013
134- **KÜBİZM**, Pierre Cabanne, Kasım 2013
135- **SOSYALİZM**, Michael Newman, Kasım 2013
136- **JUNG**, Anthony Stevens, Ocak 2014

KUANTUM

JOHN POLKINGHORNE

Türkçesi: ÜMİT HÜSREV YOLSAL

NEWTON'DAN BU YANA FİZİK ALANINDAKİ EN ÇARPICI VE HEYECAN VERİCİ GELİŞMENİN KUANTUM OLDUĞU ARTIK GENEL BİR KABUL GÖRÜYOR. ATOMALTI DÜNYANIN SIRLARINI KEŞFETTİKÇE TAMAMEN FARKLI BİR EVREN RESMEDEN KUANTUM BİR TARAFTAN DA FİZİK BİLİMİNİN SINIRLARINI AŞAN BİR ETKİYE SAHİP. TÜMÜYLE ALANA HAS BİR TERMİNOLOJİ KULLANARAK KUANTUM ÜZERİNDEKİ ESRAR PERDESİNİ KALINLAŞTIRAN KİMİ SAHA ÇALIŞMALARININ AKSİNE, ELİNİZDEKİ İNCELEME KUANTUM EVRENİNİN ÖZLÜ, ANLAŞILIR BİR RESMİNİ ÇİZİYOR. BUNUNLA BİRLİKTE, KONUNUN ANCAK TEKNİK BİR KAPSAMDA İRDELENEBİLECEK ÖZGÜL YANLARINI TARTIŞMA DIŞINA İTMEYİP MATEMATİKSEL FORMÜL VE AKSİYOMLARLA DESTEKLENEN BİR GENEL ÇERÇEVE SUNUYOR OKURA. YİRMİNCİ YÜZYILIN BU BÜYÜK BİLİMSEL DEVRİMİ İÇİN ZİHİN AÇICI BİR TARTIŞMA.

Kültür Kitaplığı: 137; Bilim: 6



D